

美国阿拉斯加北坡永冻带天然气水合物 研究和成功试采

左汝强¹, 李 艺^{2,3}

(1. 国土资源部, 北京 100812; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 3. 《探矿工程(岩土钻掘工程)》编辑部, 北京 100037)

摘要:阿拉斯加北坡(ANS)永冻带蕴藏着丰富的天然气水合物资源,该地区是美国天然气水合物研究开发的特定目标之一。自 1970' 年代起,美国先后研发的 PCB 和 PCS 天然气水合物保压取心器应用于 DSDP、ODP、IODP 和 ANS。第一口旨在研究阿拉斯加天然气水合物的热冰 1 并于 2004 年初完成。该井虽然没有钻遇到水合物层位,但是许多新开发的技术,如北极钻井平台、移动式岩心实验室、智慧钻井等成功地获得了应用。艾尔伯特山 1 号研究井于 2007 年 2 月顺利地钻至 914 m,全井取心率 85%,并进行了测井和运用组合地层动态测量仪对井下压力测试,完成了全部预期研究目标。对“自然产生的”和由“油气钻采工业诱发的”与水合物相关的地质灾害进行了研究,后者主要分为 3 类,即穿越天然气水合物钻探、穿越天然气水合物深部油气开采及开采天然气水合物的生产。对天然气水合物,特别是运用 CO₂-CH₄ 置换法开采水合物的理论和实验室的研究,在美国许多学术机构和大学有成效地进行了许多年。2012 年 5 月,康菲公司与日本国家油气与金属公司(JOGMEC)以及美国能源部(DOE)合作,运用 CO₂-CH₄ 置换法,圆满地完成了 Ignik Sikumi #1 井的天然气水合物试采。在 38 天返排期间气体生产的 30 天内,累积生产甲烷气体约 28317 m³(100 万 scf)。该项试采工程结果表明,CO₂-CH₄ 置换法是天然气水合物开采重要而有效的方法之一,它可在较大程度上减少对环境的污染和破坏。

关键词:天然气水合物;冻土带;保压取心钻具;地质灾害;天然气水合物试采;CO₂-CH₄ 置换法;产气率;累积产气量;气体返排;阿拉斯加北坡

中图分类号:TE37;P634 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2017)10-0001-17

The Research and Successful Production Test for NGH in Alaska North Slope, USA/ZUO Ru-qiang¹, LI Yi^{2,3} (1. The Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, Beijing 100812, China; 2. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 3. Editorial Board of Exploration Engineering, Beijing 100037, China)

Abstract: Alaska North Slope(ANS) permafrost zone is rich in hydrate resource, where is one of the specified targets for hydrate R&D in USA. The PCB and PCS pressure core samplers for NGH in USA have been respectively developed and applied in DSDP、ODP、IODP and ANS since 1970's. Hot Ice #1 well, the first dedicated hydrate research well in Alaska, was completed in early 2004. Newly developed Arctic Drilling Platform, Mobile Core Lab, Smart Drilling etc. were successful deployed in the research well despite of missing the hydrate layer. Mt. Elbert #1 research well was smoothly drilled (to 914m), cored(recovery 85%), logged and downhole pressure tested with MDS in February 2007. This science program successfully achieved all of its objectives. Naturally occurring geohazards and "Industrial" gas hydrate-related geohazards were studied, the latter can be categorized mainly as follows: Drilling through GH, Producing through GH and Producing from GHgeohazards. The theoretical and lab studied of NGH, especially for hydrate production with CO₂-CH₄ exchange technology, have been effectively executed for decades by many academic centers and universities in USA. In May, 2012, ConocoPhillips, in a cooperative effort with the JOGMEC and the U. S. DOE, successfully completed Ignik Sikumi # 1 well gas hydrate production test using CO₂-CH₄ exchange method in ANS. Overall, the well produced for 30 days during the 38-day flow-back period, with cumulative gas production approaching one million scf (28317m³). The test result shows that CO₂-CH₄ exchange for NGH production is one of the most important and effective methods, which can greatly mitigate environmental pollution and damage.

Key words: natural gas hydrate (NGH); permafrost zone; pressure core tool; geohazards; NGH production test; CO₂-CH₄ exchange method; gas production rate; cumulative produced gas; gas flow-back; Alaska North Slope(ANS)

收稿日期:2017-09-08

作者简介:左汝强,男,汉族,1941年生,国土资源部咨询研究中心原咨询委员,教授级高级工程师,探矿工程专业,北京市海淀区北三环中路 77 号 24 楼 1003 室(100088),zrq1941@sina.com。

0 引言

美国是世界上天然气水合物(以下简称“水合物”)蕴藏地域最广、资源最丰富的国家之一,同时也是能源需求大国与全球科技强国。阿拉斯北坡(ANS, Alaska North Slope)加永冻带蕴藏着丰富的天然气水合物资源。1983年,在美国能源部资助下,美国地质调查局(USGS)和苏联地质部联合对阿拉斯加州已知水合物气藏的资源潜能进行了评价。2000年,ANS水合物被能源部列入六个由工业与学术机构联合研发的项目之中^[1]。之后,又作为特定的水合物的调查与开发目标之一。2004年,在美国能源部组织领导下,实施了阿拉斯加第一口水合物调查研究井——热冰1井。2007年,又在阿拉斯加北坡钻探了艾尔伯特山1号水合物探井。与此同时,美国在天然气水合物保压取心钻具、水合物相关地质灾害等方面开展了大量的研究;在开采理论方面,从微观到宏观多尺度对天然水合物储层及其特性进行了理论和实验研究。在对 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法进行大量深入室内实验的基础上,于2012年,在阿拉斯加 Ignik Sikumi#1井,运用 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法成功地完成了水合物的第一次试采工程。这是继2008年加拿大 Mallik 天然气水合物采用降压法试采成功^[2]之后,美国运用创新的 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法实施水合物试采的工程项目。

1 美国天然气水合物保压取心钻具的研发和应用

水合物保压取心技术是水合物勘查技术体系中最重要的一部分,对天然气水合物的赋存状态进行准确的调查评价,对于水合物试采生产井井位的选择,以及对生产井内开采储层井段位置的确定,都起着决定性的作用。

水合物赋存于海底深部和陆域永冻层中,在低温($0 \sim 10\text{ }^\circ\text{C}$)及高压(大于 10 MPa)的条件下形成。在水合物钻探中,为取得高保真水合物样品,必须采用保压取心器,若附带保温功能则更佳。美国从1973年起,先后研发并应用了两种水合物保压取心装置:PCB保压取心器和PCS保压取心系统。

1.1 PCB保压取心器(Pressure Core Barrel)^[3]

1973年研发出PCB I型保压取心器,于深海钻探计划(DSDP)及黑海进行了试验。此后又先后研发出PCB II型和PCB III型。PCB III型保压取心器简要结构见图1。

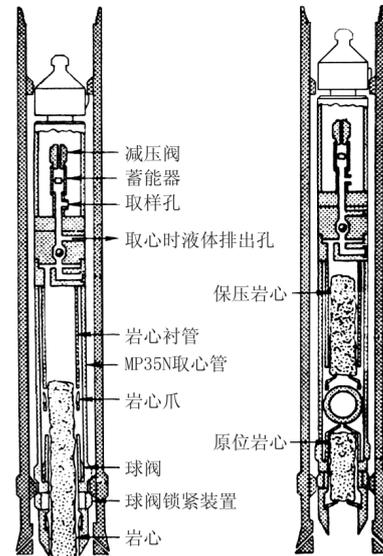


图1 PCB III型保压取心器结构示意图(应用于DSDP)

其保压取心过程如下:当钻头进入水合物储层后,通过锁紧于钻具的球阀中央圆孔,水合物岩心进入岩心管(左图);当岩心管装满岩心后,借助冲洗液压力通过拉杆拉动球阀两侧的偏心轴,转动球阀,使球阀关闭(右图),且球阀组合件与钻具脱离,用绳索取心装置提上保压岩心样品。图2为PCB II型保压取心器球阀组合件部分结构。PCB的蓄能器是用于补偿球阀关闭时产生的体积变化,以及向上提升保压取心器过程中内外压差增大时,引起样品流体(分解出的甲烷气和水等)向外渗漏泄压。



图2 PCB II型保压取心器球阀组合件部分结构^[3]

PCB三种型号从1973—1980年约8年时间,先在DSDP的44、47、62等航次进行海试,因故障频出,效果甚差。直到1980年,PCB III型在DSDP 76航次533站位应用时,才获得第一次基本成功。在该站位水深 3184 m ,海底深度 $152 \sim 399\text{ m}$ 的沉积物中下井试验5次。其中3次取到原位压力($27.5 \sim 32.3\text{ MPa}$)的岩心;第2次取到岩心但几乎无压;第4次因减压阀堵塞,取上岩心压力只有 10.3 MPa 。这次PCB III型保压取心器保压取心成功率为60%。此后,PCB III型取心器还在DSDP 84和

96 航次中运用过。

1.2 PCS 保压取心系统(Pressure Core System)^[4]

自 1985 年启动的大洋钻探计划(ODP)研发了 PCS 保压取心系统(图 3)。

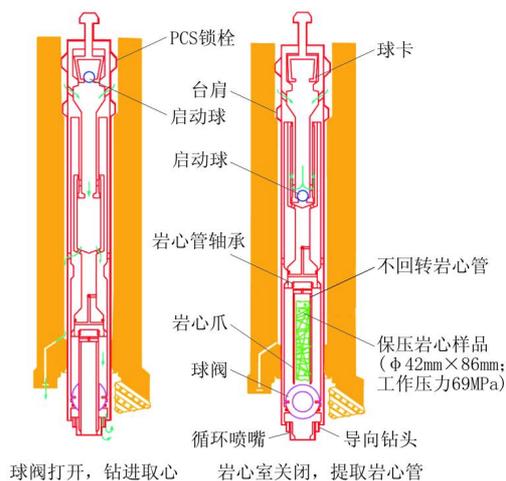


图 3 PCS 保压取心系统(应用于 ODP、IODP)

通过简化结构、优化设计、提高性能,PCS 保压取心系统对 PCB 的改进提高主要有以下几个方面。

(1) PCB 每个回次下井取样提上退出岩心后,需将球阀组合件等内部结构拆卸、清洗、调整,需 2~5 h;而 PCS 清理、调整则非常简便。

(2) PCB 保压性能指标不大于 35 MPa;PCS 提高至 70 MPa(实际也未能达到)。

(3) PCB 同一回次能取几段岩心,可取岩心长度 6 m,岩心直径 57.8 mm,但多出故障;PCS 改为每回次只取一段岩心,长度 86 cm,岩心直径 42 mm,提高了工作可靠性。

(4) PCB 只能与回转取心器(RCB)井底组合联合使用;PCS 则可和更多类型的取心器,如超前式取心器(APC)、伸缩式取心器(XCB)井底组合联合使用,扩展了功能等。

ODP 164 航次(1995 年)在美国布莱克海岭,运用 PCS 保压取心系统取出的保压水合物样品见图 4^[5]。该岩心样品尺寸约为 $\varnothing 50\text{ mm} \times 140\text{ mm}$,表层糊有薄层邻近的灰色粘土浆泥,其上白色斑点为水合物分解后形成气泡的反光。此后,PCS 取心系统曾应用于 ODP 124、139、141、146 等航次。2005 年,在综合大洋钻探计划 IODP 311 航次中,运用了 PCS 保压取心系统。欧盟于 2000 年研发成功的 FPC 高压冲击取样器和 HRC 高压回转取心器,也在该航次中对水合物进行多次保压取样。笔者对 PCS、FPC、

HRC 三种保压取心器在 IODP 311 航次中共计 43 次下井取心原始记录^[6]统计分析,应用效果列于表 1。由表 1 可见,3 种保压取心器的保压取心成功率依次为 67%、22% 和 40%。

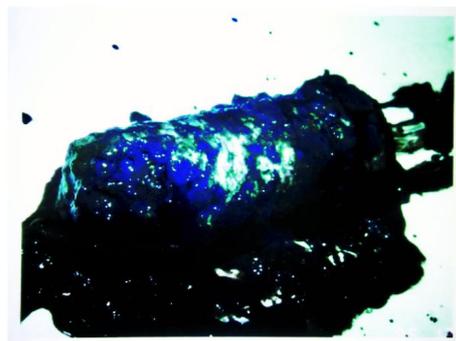


图 4 ODP 164 航次在美国布莱克海岭运用 PCS 取出的水合物样品

表 1 IODP 311 航次三种保压取心器取心效果统计

取样器	取心次数	取心成功次数	取心成功率/%	保压成功次数	保压成功率/%
PCS	24	20	83	16	67
FPC	9	7	77	2	22
HRC	10	6	60	4	40
总计	43	33	76.7(平均)	22	51.2(平均)

2012 年 6 月,日本深部地球勘查中心(CDEX)研发的第三代 Hybrid PCS 保压取样器,在南海海槽 5 次下井取样试验^[7]。其中 2 次保压取心失败,此次海试,保压取样成功率也只有 60%。

由上可见,美国 PCS 保压取心系统与欧盟两种、日本一种水合物保压取心器相比,其总体技术性能(可靠性、保压指标)略为高些。PCS 保压取心系统除在 ODP 和 IODP 许多水合物勘查航次中运用外,还在美国“国家水合物研究开发计划”项目四大海域,以及阿拉斯加永冻带水合物的勘查和试采中广泛应用。

1.3 美国运输部(ODT)批准的运输用水合物保压岩心压力容器

1.3.1 用途

该运输用保压岩心压力容器^[8]由德克萨斯农业与机械大学研发(图 5),提供 ODP(特别是 204 水合物调查航次),用于将“决心号”钻探船在海域提取的完整水合物保压岩心予以保存,尽量保持其原位压力、温度、结构和外形等,借助该压力容器,能够将岩心保压地转运到陆上远处的专业实验室。

1.3.2 技术参数

内径 9.53 cm ($3\frac{3}{4}$ in); 岩样长度 26.4 cm

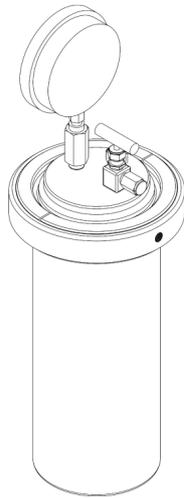


图5 美国运输部批准的运输用水合物保压岩心压力容器

(10.4 in);工作压力 13.79 MPa (2000 psi);材料为 316 不锈钢,O 形圈密封;质量 13.6 kg。价格 2500 美元(2003 年)。

2 2003—2004 年阿拉斯加北坡第一口水合物研究井——热冰 1 井项目实施^[9]

2.1 热冰 1 井(Hot Ice #1 well)的目标任务

(1)研究评价该地区水合物的形成与赋存,确定水合物储层潜在的可采收天然气量与可能的生产率。

(2)对研发的永冻带水合物的钻探和取样设备、器具以及技术、方法进行试验。

2.2 项目参加机构

参加项目的机构有:美国能源部(US DOE)国家能源技术实验室(NETL, National Energy Technology Laboratory);Maurer Technology Inc., Noble 钻井公司分公司;阿纳达科石油公司(Anadarko Petroleum Corporation);Noble 工程和开发公司,Noble 钻井公司分公司;阿拉斯加大学安克雷奇分校(University of Alaska, Anchorage);美国地质调查局(USGS);劳伦斯-伯克利国家实验室(LBNL, Lawrence Berkeley National Laboratory);Schulumberger 公司;包尔森地球物理公司(Paulsson Geophysical Services)。

2.3 热冰 1 井位置与设计井深

热冰 1 井位置距 Kuparuk 河油田中心以南 20 英里(1 英里 = 1.609 km,下同),普拉德霍湾 40 英里。计划完井深度 792 m(2600 ft)。

2.4 北极钻井平台(Arctic Drilling Platform)的设计应用

鉴于在北极地区钻探作业的时间受限,只能在地表牢固冻结期间的 12 月至次年 4 月内进行,为此专门设计了北极钻井平台(图 6)。



图6 北极钻井平台(Anadarko 公司提供)

2.4.1 北极钻井平台的结构

由 16 个轻质铝合金模块固定在一起。每个模块安装在冻结于地表冻土层的钢腿上。另外 5 个相互联接牢固的模块形成一个平台,作为钻探设备的基础,钢腿支撑钻井平台距地面 3.66 m(12 ft)。

北极钻井平台的两个部分具有足够大的面积,可容纳钻机、泥浆泵、现场岩心分析实验室与其它附属设施,以及 40 名技术和操作人员的生活区。

2.4.2 北极钻井平台的优点

这种设计的优点是尽量减少对生态敏感的北极地区环境的影响,并可以延长钻探施工作业的时间。(1)钻探设备四周保证足够的空气流通循环;(2)夏季阳光可照射到钻井平台之下永冻土的草地,保护环境;(3)钢腿相对细而短,所插入的孔洞易于回填,对地面扰动很小;(4)钻井平台无需在地面建造临时冰垫,也不需要大的卵砾石铺垫钻探设备基础,免于对地表环境破坏。

2.5 钻进、取心与测井

2.5.1 钻进过程

采用 DynaTec 1500 型矿山钻机,能钻进硬岩,且体积小适于安装于北极钻井平台上。

热冰 1 井于 2003 年 3 月 31 日开孔,在 4 月第一周内顺利钻进。运用 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($23\text{ }^{\circ}\text{F}$) 的低温冲洗液,防止岩心融化分解。于 4 月中旬钻穿永冻层底界到 427 m 深度,后遭遇非季节性北极地区气温升高,试验井于 4 月 21 日停钻。

在停钻期间,进行了两项工作:一项是分析研究

采取的岩心和测井数据;另一项是试验北极钻井平台。

2004 年初继续向下部钻进,于 681.3 和 683.8 m 出现轻微重油显示。至 2004 年 2 月 7 日钻至设计终孔深度 792 m,其中钻至地质上推测的水合物储层下界约 100 m,但未直接钻到水合物储层。

2.5.2 取心

对热冰 1 井全井连续取心,运用绳索取心系统快速取心。2003 年 4 月钻进上部含冰永冻带至 427 m,岩心采取率约 95%。2004 年钻进下部未冻结的松散沉积物(428 ~ 701 m),岩心采取率达到 94.5%。在取心过程中,运用 Sandia 国家实验室提供的仪器监测井下静水压力和泥浆温度。

2.5.3 测井

在钻进过程中,运用新型与传统测井仪器相结合,以测量热冰 1 井中储层的孔隙度和水饱和度等数据,以确定天然气水合物的性质。

2.6 移动式岩心测试实验室及现场分析

移动式岩心测试实验室安装于钻井平台上,靠近钻机 and 孔口。对采取于水合物储层的岩心分析测试有两种方式。

2.6.1 整段(6 in)(1 in = 25.4 mm,下同)岩心测试

整段岩心放置于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的组合装置中测试,包括伽马射线、白光摄像、IR 温度和速度测量。Schulumberger 公司提供 CMR 仪器用于核磁共振测量。地质描述也是将岩心置于冷槽中进行。

2.6.2 1 in 岩心测试

取新鲜、清洁、干燥的岩样,在限定的应力条件下,测量孔隙度和渗透性、电阻率与热导性。

配备一个限定应力、温度和压力受控制的岩心核磁共振系统,对水合物(岩心)不同的分解阶段作核磁共振测量。收集水合物分解出的气体,按不同时间分解的体积,计算出水合物分解的速率。运用四极物质分析仪测试水合物分解出的气体成分。将所有岩心的测量数据存储于计算数据库中,以备将来使用。

2.6.3 轻便高分辨率 X 射线 CT 扫描仪

X 射线 CT 扫描仪运用于岩心测量,能够获得对矿物成分、地层结构等更为精细的认识。此前美国水合物调查都是将岩心送到医院的人体 CT 扫描仪去测试(印度雇用“决心号”钻探船海域水合物取

样,也是将水合物岩心送到新德里大医院去作 CT 扫描)。这不但麻烦费时,更重要的是水合物保压样品经长途运送,到医院测试时早已失去其原位性质和形态。为此,美国劳伦斯-伯克利国家实验室(LBNL)在国家能源技术实验室(NETL)的支持下,研发了轻便式 X 射线 CT 扫描仪。

(1)轻便式 X 射线 CT 扫描仪的频繁运用^[10]。

该轻便式 X 射线 CT 扫描仪因质量轻(比医用仪器减少 80% 质量),体积小(约相当于家用冰箱尺寸),图像分辨率高等优点,研发成功后,随即安装于“决心号”钻探船内(图 7),参加 2002 年下半年的 ODP 204 航次(美国西北海域)任务。回来后就安装至移动式岩心测试实验室中,运往阿拉斯加北坡热冰 1 井试验现场,执行 2003 年试验测试任务。至同年秋天,此 CT 扫描仪又再登“决心号”钻探船,执行 ODP 最后 210 航次(加拿大东南海域)测试任务。然后又返回阿拉斯加热冰 1 井,继续执行热冰 1 井下半部井段岩心测试任务。

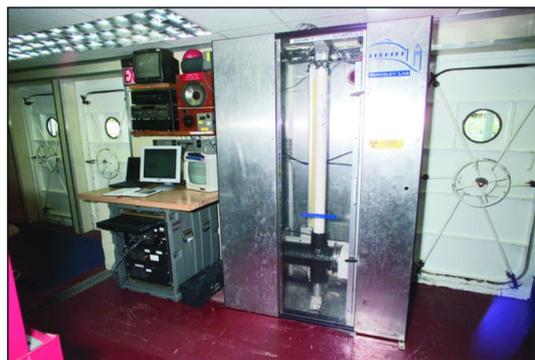


图 7 用于水合物测试的轻便式 X 射线 CT 扫描仪

用该轻便式 X 射线 CT 扫描仪对阿拉斯加热冰 1 井全部 390 段岩心中的 1/2 进行了 CT 扫描。图 8 为热冰 1 井中深度 210.9 m(693.5 ft)一段岩心运用 CT 扫描仪的扫描图像。左右两幅试样图像是成垂直正交的岩心薄片,揭示了该地层沉积环境、砂岩层理以及水合物冰状透镜体等。右侧曲线图显示了水合物冰状透镜体比周围细砂岩密度低,约为 1.3 g/cm^3 。

(2)轻便式 X 射线 CT 扫描仪的主要技术参数。

质量:200 kg;外形尺寸:1.37 m × 0.61 m × 2.03 m;测量最大岩心尺寸:Ø15 mm × 95 mm;测量方式:沿岩心轴线旋转;成像速度:A, 10 min/m(低分辨率模式),B, 30 min/m(高分辨率模式);电源:65 W,45 ~ 130 kV, 0.5 mA。

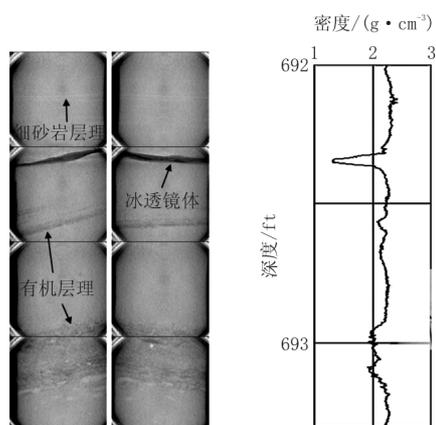


图8 热冰1井中一段岩心运用轻便式X射线CT扫描仪的图像

2.7 智慧钻井(Smart Drilling)系统

运用 Noble 工程和开发公司(Noble Engineering and Development Corporation)的 DrillSmart(钻进智慧)和 DrillGraph(钻探作图)技术,将从钻井施工现场各个传感器采集到的数据,传送到网络上,以及远离施工现场的休斯敦等地该项目各参加机构。

2.8 Rolligon 高寒地域大型通用地形运输车

Rolligon 通用地形运输车(图9)配置了大型圆筒状轮胎,可防止在冻土层或冰面道路面上打滑或下陷,且能够快速行驶。运用此载重卡车可将钻井平台模块与钻探器材等运送到热冰1试验工地。钻井平台也可用直升飞机运输。



图9 Rolligon 高寒地域大型通用地形运输车

2.9 热冰1井水合物试验项目的评价

热冰1井虽然没有直接钻遇到水合物储层,但是通过钻探、取心、测井与测试分析,获得了对该地区水合物形成与赋存的进一步认识,对于确定水合物储层潜在的可采收天然气量与可能的生产率取得了大量数据。另一方面,对所研发用于永冻带水合物钻探和取样的优良钻探设备(如北极钻井平台)、仪器(如轻便式X射线CT扫描仪)以及相关技术、

方法进行了试验应用。

3 2007年艾尔伯特山1井(Mount Albert #1)水合物试采项目实施^[11]

3.1 艾尔伯特山1井任务目标

该研究项目预算420万美元,目标是准确的提供地层水合物储量数据,以便为长期生产测试作出决定。工程期限22天,实施钻进、取心、测井及孔内测试等工作。

3.2 项目参加机构

BP 勘探阿拉斯加公司(BPXA,施工单位)、美国能源部、USGS、ASRC 工程服务公司、俄勒岗州立大学、RPS-APA 能源公司、Ryder Scott 公司及 Interpretation 服务公司等。

3.3 钻探、取心、测井

选用 Doyon 14 型钻机。2007年2月3日开钻,18日完成。开孔 $12\frac{1}{4}$ in; 后下 $9\frac{5}{8}$ in 表层套管;采用低温油基泥浆钻进;连续取心至760 m;取心后扩孔,并钻进到914 m(3000 ft)。

电缆测井:核磁共振、双极声波、电阻率扫描、裸井电子成像,以及先进的地球化学测井等。运用组合式地层动态测试仪(MDT)(13 h)获储层压力响应数据。

运用 Reed Hycalog 绳索取心钻具,连续取心至760 m 深度。在155 m 厚含水合物细砂岩、含水页岩等地层中岩心采取率达85%,岩心直径76 mm。岩心在现场处理,分样及保存250个子样品,进行岩石学、地球化学、微生物学及热力学等测试分析。并在液氮中,或充有甲烷的压力容器中储存11个样品,以便将来研究。

3.4 科学与工程成果

3.4.1 科学成果

钻穿两个水平水合物储层:D单元14 m 厚和C单元16 m 厚,两层水合物饱和度为60%~75%。

3.4.2 工程技术成果

艾尔伯特山1井为优质钻孔,主要取得如下工程技术成果:

- (1)首次运用组合动态地层测量仪(MDT)进行降压裸井测试;
- (2)首次运用绳索取心技术,取心率达85%;
- (3)采用由 M-ISWACO 提供的矿物配制的低温泥浆。

3.5 艾尔伯特山 1 井水合物试采项目评价

该项目实施证明,由 USGS 组织、研发应用的水合物勘探方法、技术是有效的。此次钻井试验是天然气水合物科学调查的一大进步。

4 美国和加拿大对油气钻采与天然气水合物相关地质灾害的研究

美国阿拉斯加北坡与加拿大麦肯齐三角洲 Mallik 都位于北极圈内,于北冰洋波弗特海岸边,而且彼此相距不远。在这片广阔的永冻带与相邻海域的大陆架都蕴藏着丰富的水合物矿藏。从 21 世纪初开始,两国都先后启动了加强陆海水合物调查,并首先在陆上永冻带试采天然气水合物^[21]。但是,无论是在陆地岸边或是海域大陆架,开采水合物与深部常规油气,都面临着由于钻采活动诱发水合物分解导致的地质灾害风险。

水合物引起地质灾害可分为两个方面,即“自然产生的”地质灾害和“油气工业诱发的”地质灾害。

4.1 “自然产生的”地质灾害

海底滑坡和塌陷等地质灾害,在过去通常被认为是由于地震、火山爆发、风暴波和沉积物快速堆积,以及海底坡体过陡等自然因素引发的。但是近年来科学家发现,海床及其下部水合物的分解是引起海底滑坡等地质灾害的另一重要原因。

引起海底水合物分解有诸多因素。但是海平面的变化和全球气候变暖则是两个最重要的因素。当海平面下降后,海底水合物储层压力降低,促使水合物分解,释放气体,使水合物稳定带(HSZ, Hydrate Stable Zone)从胶结状态转变为充气状态,沉积物固结强度降低从而引起滑坡或坍塌(图 10)^[12]。但是,近若干年来的趋势是全球气候变暖,引起北冰洋等区域冰的融解,使海平面上升。海水上升淹没海岸会引起近岸永冻层,与海底排气孔道产生热应力并向周围传播热量,使水合物分解,造成地层不稳定,引起海底滑坡或塌陷。而气候变暖则将直接促使海水温度升高,“暖”的海水淹没海岸含水合物的永冻带,以及升高温度的海底都会促使水合物储层的分解,引起滑坡或海底沉降。而且,水合物分解产生的甲烷气体将对海洋生态环境产生不良影响,增强温室效应等。

4.2 “油气工业引起的”与水合物相关的地质灾害^[13]

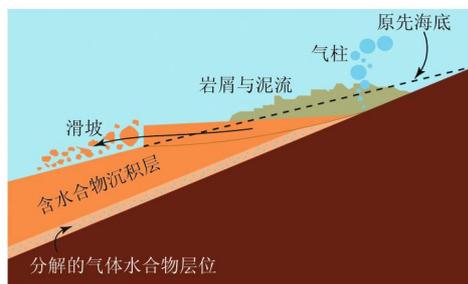


图 10 海底水合物分解诱发的滑坡

图 11 展示了由油气钻采工业引起的与水合物相关的地质灾害。图右部分陆域永冻区表示美国阿拉斯加北坡和加拿大的麦肯齐三角洲,图左海域部分则表示为北冰洋。这一类地质灾害主要分为 3 类,分别表述如下。

4.2.1 海底油气开采基础设施的灾害

安置于海底的油气生产和运输设施,如油气管线等可传递各种应力,特别是热量,可传导至浅部设施底基。若这种设施安置于海底表层水合物(如固结性海床地层有排孔道的小丘)之上,则水合物将发生分解,导致沉积物性质的变化,或海底物质移动,就可能破坏这些设施。通过在油气资源开发前实施浅层环境灾害调查(例如,参见 Gharib et al., 2008),探测出较大海底水合物的赋存状态,则可以减轻或避免灾害的发生。

4.2.2 穿越水合物储层实施钻探

天然气水合物,如游离气体和过压含水砂岩在深水和具有厚的永冻层陆地,被认为会引起钻探灾害。虽然已经在世界上深水可能有水合物的地层中,钻进了数千口井(Smith et al., 2005),但据报告称,只发生过少数的和规模小的钻探事故(Nimblett et al., 2005)。美国墨西哥湾水合物联合工业项目(GOM JIP)所做的工作已证明,认真地对钻井液温度进行控制,足以降低在低饱和度、水合物聚集的页岩中穿越实施钻探引起水合物分解的风险(Birchwood et al., FITI. v. 8)。同样,若能有效地探测到海床水合物小丘和含厚层水合物的下部砂岩,也可以运用现有的浅层灾害评估方法减少或避免风险。

北极地区已经发生过与水合物相关的少量的井控事故。最著名的是 1992 年发生于阿拉斯加的 Cirque #1 井的事故。那次施工中,在尚未安置浅井套管之前,对来自井下更深储层的油气所采取的控制措施,就未能阻止较浅含水合物地层的分解

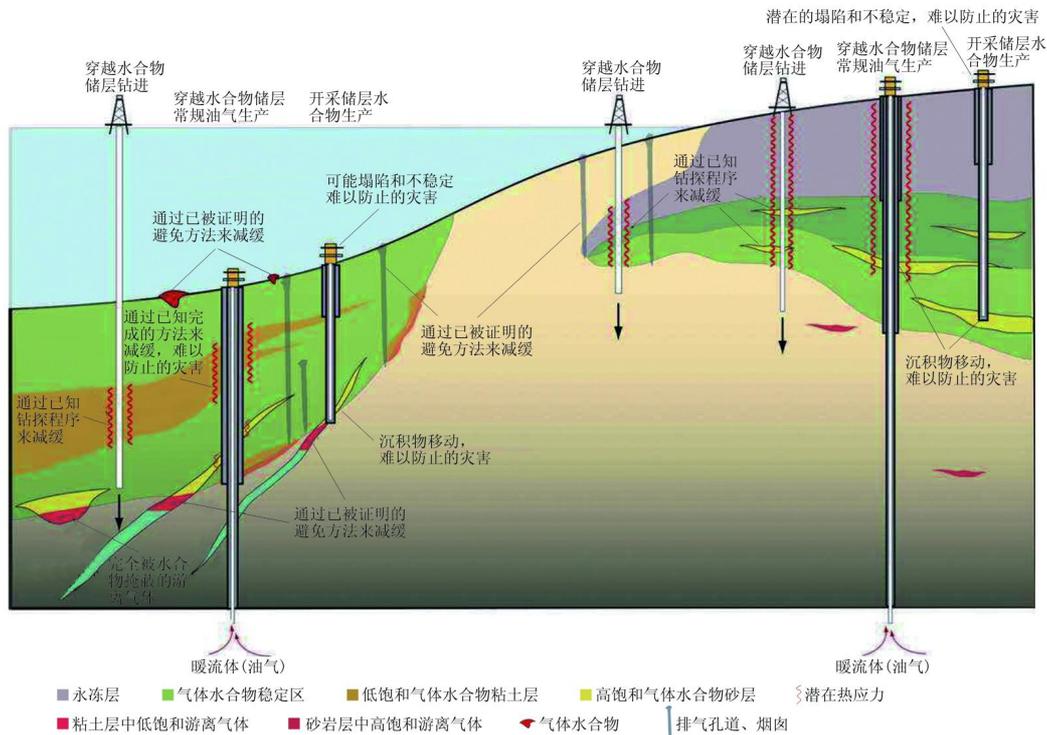


图 11 “油气钻采工业诱发的”与水合物相关的地质灾害的位置和特征^[13]

(Collett and Dallimore, 2002)。后来,运用了能够安全钻井的钻探方案才得以有效处置。在浅水的北极大陆架钻井,由于永冻层和水合物因近年来海平面上升引起大陆架的淹没,将要求控制类似的地质灾害。在北极和深水施工环境,一旦钻进至含水合物地层井段,必须下套管、注水泥。一般水泥会引起附加热应力,需采用低热水化的水泥可以减少灾害(Collett and Dallimore, 2002)。

4.2.3 穿越浅部水合物储层开采深部(常规)油气

成功的深水或北极的勘探井,应该是能够使得深部长期开采的热的油流体,通过被水合物沉积层所包围的钻井浅部井段。这样开采深部(常规)油气会产生热应力,导致浅层水合物储层的分解,以及沉积层物理性质的变化,包括强度降低。在某些情况下,会发生应变,导致套管可能损坏(Moridis and Kowalsky, 2007),或者形成气体泄漏到套管之外的通道。马来西亚近年来海上油气开发,运用保压岩心和测井数据校正数字模型表明,由油气生产并发散的热传导,将会在低饱和度、含水合物的粘土储层内形成水合物分解的前沿,能够在具有30年生产周期的6口丛式井的中心向外扩展60~90 m(Hadley et al., 2008)。采取措施如隔离井眼可减轻但不能消除灾害。关于穿越浅部水合物储层开采深部

(常规)油气产生的热传导,对地质灾害影响的问题还有待进一步研究。

4.2.4 实施水合物储层的生产开采

没有进行过水合物的野外生产试验,就很难对水合物储层的地质力学反应、水合物的分解和气体生产有真正的认识 and 了解。对海洋水合物唯一的生产灾害很可能发生于相对浅的生产层位。这些水合物储层在其原有状态下通常是非常不稳定的,而且其上面还覆盖着相对软的、非固结的泥质沉积物。因此,由于水合物的开采将会造成地质灾害,包括由于沉积物运动、海底不稳定、地面沉降及气体运移引起的井眼坍塌,或滑坡。

应加强对计划中的水合物开采在试验之前、期间及之后的基本准备与监测研究(Nagakubo et al., 2010, FITI, v. 10, Iss. 3),认真实验,以及运用地质力学规律进行先导性水合物生产模拟试验。

5 美国实验室水合物研究及 CO₂ - CH₄ 置换法试采的实验研究

5.1 从微观到宏观尺度对天然气水合物的理论和实验研究^[14]

几十年以来,美国等国家的研究者已经能够对多种不同尺度、相互独立的水合物建立起模型与模

拟系统。但是,能够对这些多个时间和空间尺度模型之间建立联系的探索研究,只是在近年才开始进行的。几年来,在国家能源技术实验室(NETL)、匹兹堡大学(University of Pittsburgh)和西弗吉尼亚大学(West Virginia University)以及其它研究机构,开始从微观分子水平建模到宏观自然界水合物系统,以及水合物的回收率等问题展开了深入的研究。参与部分研究工作的还有 NETL 的先进能源供给研究所(IAES, Institute for Advanced Energy Solutions)。

水合物储层的性质由气体(如 CH_4 、 CO_2 等)和水分子以及主体介质之间的相互作用来控制。而自然界水合物储层在垂直深度上赋存达数十米,在水平方向上则延伸达几公里(图 12)。在过去许多年,

已经对水合物分子级的尺度建立模型(MLM, Molecule Level Modeling)方面做了许多研究,图 13 表示 CO_2 水合物分子级模拟(a),与在水合物稳定带的理想化孔隙中水合物-液相形态(b)^[15]。在纳米和分子的尺度,可以利用分子建模来估算水合物的关键参数,例如热膨胀、等温压性、热导性,及大尺度模型中必要的水合物分解速率。这些模型可以延伸到相关的真实的自然界状况,如沉积物的组成和孔隙度,并在不同详细的程度上,与储层模拟模型综合集成起来,运用储层模型计算提出时间超过 10 年的水合物生产方案。

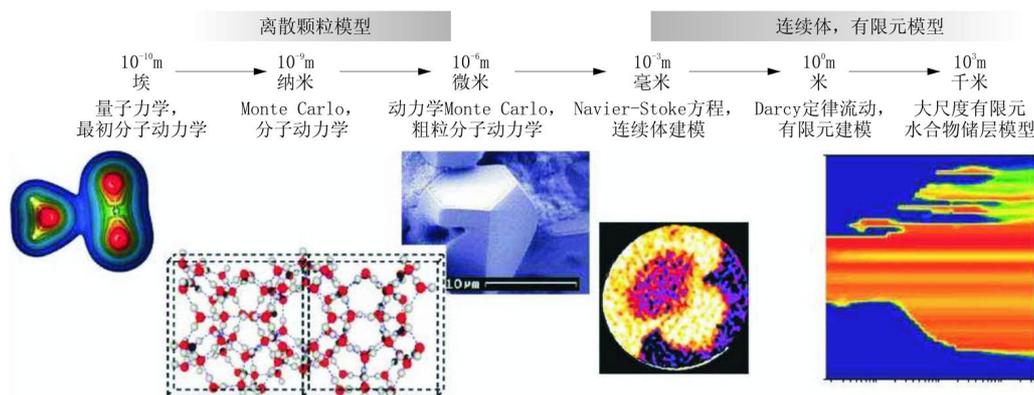
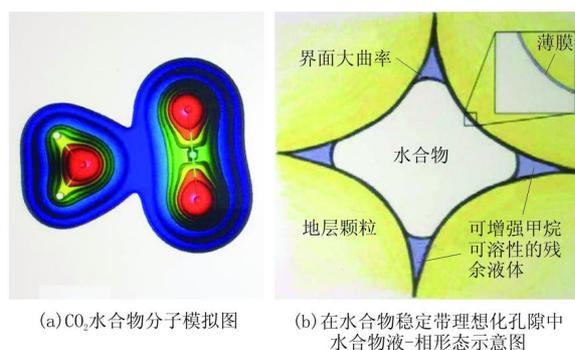


图 12 从微观分子到宏观自然界储层多种尺度的水合物研究^[14]



(a) CO_2 水合物分子模拟图

(b) 在水合物稳定带理想化孔隙中水合物液-相形态示意图

图 13 水合物分子级模拟示意

5.2 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法试采水合物从设想到实验

2007—2008 年加拿大 Mallik 2L-38 试验井运用降压法并辅以井内加热,实施水合物试采获得了很大的成功^[2]。但是,对于大规模的商业性生产水合物的经济实用性,以及减少和防止地质灾害的风险,仍还是存在很大的不确定性。

与此同时,有些科学家对另一种将 CO_2 注进水合物进行生产的方法进行了探索研究。 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$

置换法开采水合物的设想首先是由日本学者提出的。1986 年, K. Ohgaki 等第一次提出这个设想; 1998 年, S. Nakano 等进行了 CO_2 置换水合物 CH_4 的实验。2001 年, 美国学者 Smith 等对 CO_2 置换多孔介质中水合物的 CH_4 进行了可行性分析。此后, 美国若干国家实验室与大学和石油公司联合, 积极地多次开展水合物 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法的实验室研究。

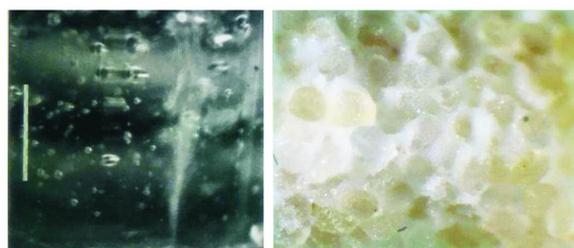
5.3 运用 CO_2 和水的微乳化液置换水合物中甲烷的实验研究

5.3.1 项目实施单位

美国西北太平洋国家实验室(PNNL, Pacific Northwest National Laboratory)、阿拉斯加大学费尔班克分校与 ASRC 能源服务公司。阿拉斯加北极能源技术开发实验室(Arctic Energy Technology Development Laboratory, Alaska)也参与了这方面的研究工作。

5.3.2 项目实施过程和效果^[16]

2003年,以 McGrail 为首的科学团队使用微乳化液注入技术,进行实验室规模的强化气体水合物采收率(EGHR, Enhanced Gas Hydrate Recovery)的模拟研究(图14)。在兰色管腔内(21℃, 1000 psi)放置含有甲烷水合物的砂岩圆柱样品,将配比为1:2的CO₂和水在15℃时形成的微乳化液,注入初始温度为2℃的含水合物的砂岩柱内(图14a,高速摄像照片)。从砂岩试样的出口处获取甲烷气体样品,运用色谱分析仪进行分析。结果是,在所采取的气体中并不包含CO₂,而只有甲烷。围绕砂岩圆柱样品安置了许多热电偶,用以跟踪温度变化。在终止注入微乳化液之后,温度降低回到原来的控制点,直到大约4h之后观察到温度突然升高(此种化学置换反应是放热的)。这就表明,在砂岩样品内已经生成了CO₂水合物,CO₂-CH₄的置换过程已顺利完成。图14(b)为CO₂-CH₄置换过程完成之后砂岩圆柱局部样品的放大照片,此时砂岩样品颗粒间的空隙充填了CO₂水合物。



(a)将CO₂和水的微乳化液注入含水合物砂岩样品的试验腔内
(b)置换反应后在样品砂岩颗粒孔隙间充填了CO₂水合物

图14 运用CO₂和水的乳化液置换水合物甲烷的实验

这项早期实验室的研究结果是极其令人鼓舞的,但显然仍有大量的补充工作要继续去做,以进一步证明这种置换方法,特别是还需要在水合物的储层规模中试验,以评估这种方法的经济潜力。阿拉斯加北坡(ANS)已被证实具有丰富的水合物资源,运用这种置换方法进行水合物生产试验似乎是理想的。而且其附近还具有潜在的CO₂资源,并已经建有(或正计划建设)的基础设施可将生产的甲烷天然气运往市场。

5.4 砂岩样品首先生成水合物再注入CO₂气体和水置换水合物甲烷的实验研究^[17]

5.4.1 项目实施单位

挪威卑尔根大学(University of Bergen)和康菲(ConocoPhillips)石油公司。

5.4.2 项目实施过程和效果

从2002年起,上述两机构就进行了多次的实验合作,在康菲公司巴尔特莱斯维尔(Bartlesville)技术中心的磁共振成像(MRI, Magnetic Resonance Imaging)实验室进行。

试验起初的设计是将一段Bentheim砂岩岩心从中间劈分两半,嵌进4mm厚的高密度聚甲醛(POM, polyoxymethylene)的衬片(图15),以增加水合物生成的附着和运用CO₂置换的有效表面。这块POM衬片提供作为收集水合物分解后释放出甲烷的收集器。这种试验方法以后曾多次运用于水合物生成和生产性试验。

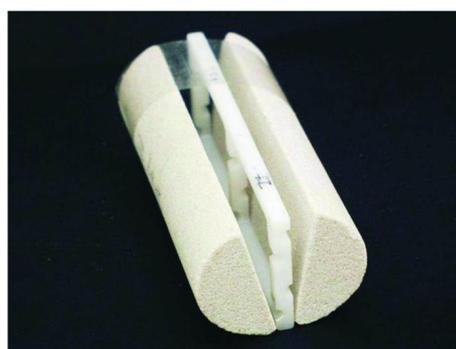


图15 用于生成水合物的砂岩岩心与收集CO₂置换出的甲烷的POM衬片

放置砂岩试验样品的容器由充满FluorinertTM的循环系统来冷却。合成水合物的甲烷气和水,与用以置换甲烷的CO₂气体,通过一套高精泵输送入这个试验岩心样品的容器内。

试验分两个阶段进行。首先,在容器内破开砂岩岩心的试验样品上生成水合物,然后注入CO₂从水合物中置换出甲烷,由POM衬片附着收集。

具体实验过程与效果运用磁共振成像(MRI)仪器显示,参见图16(a)-(d)。在将容器内温度冷却至4℃的期间内,(a)显示,在注入甲烷气和水一段时间之后,在岩心上已形成了大量水合物(绿色);(b)显示,当注入CO₂和水之后一段时间,在岩心的一端孔隙中只剩下尚未起反应的水,并在衬片和岩心端部留下CO₂置换出的甲烷(蓝色);(c)显示,再过去较长一段时间后,衬片上蓝色甲烷图像逐步增强;(d)表明,从渗透着水合物的砂岩岩心中被置换出的甲烷已经聚满在衬片上了。

这项试验证明,CO₂-CH₄置换法实施水合物生产在原理和实际上是可行的。挪威卑尔根大学和康菲公司后来又做过许多此类试验,如在细粒

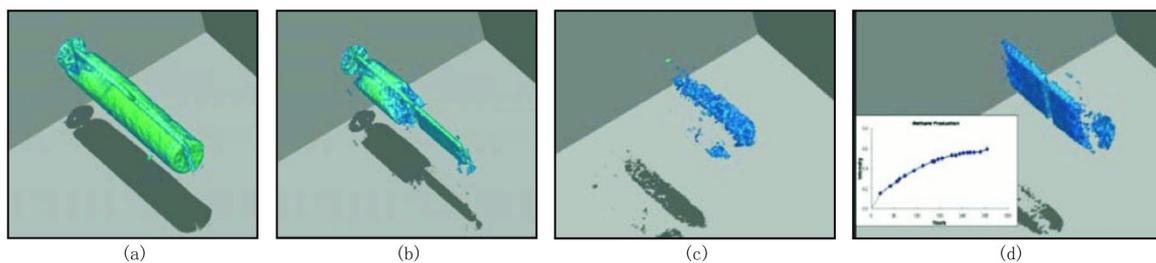


图 16 运用 MRI 仪器显示砂岩样品首先生成水合物再以 CO_2 置换出甲烷的实验效果

未固结砂岩和细砂岩中运用 CO_2 置换水合物 CH_4 的试验。

5.5 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法理论和实验研究的成果和认知

天然气水合物可认为是一类主 - 客体 (Host - Guest) 材料,水分子 (主体分子) 形成一种空间点阵 (笼形) 结构,气体分子 (客体分子) 则充填于点阵间的空穴之中。由于客体分子在空隙中的分布是无序的,不同条件下晶体中的客体分子与主体分子的比例是不同的,因而水合物没有确定的化学分子式,是一种非化学计量的化合物,可用 $\text{M} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 表示。M 代表水合物中的气体分子 (客体分子), n 为水合指数 (即水分子数)。常规天然气的成分,如 CH_4 、 C_2H_6 等及其同系物,以及 CO_2 、 N_2 、 H_2S 等都可以形成单种或多种的水合物。^[18]

单纯的甲烷 (CH_4) 和 CO_2 , 以及它们的混合物可形成 I 型结构的水合物 (Sloan, 1998, Lee et al., 2003)。 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法发生的驱动过程,是由于在水合物笼形结构中, CO_2 和水的结合比 CH_4 具有更大的化学亲和力,它很容易地将 CH_4 从水合物中“挤出”,取而代之,转变为 CO_2 水合物。

由康菲公司 - 卑尔根大学团队,以及美国其它研究机构所开展的多年工作,已经表明在多孔介质的地质条件下,通过置换法的实验和建模成果 (Graue et al., 2006; Stevens et al., 2008) 证明这种新方法是具有应用前景的,并总结出 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法对于水合物生产的潜力和优越性,以及存在的挑战和问题。

5.5.1 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法水合物生产的潜力和优越性^[19]

(1) 为水合物开采提供一种运用 CO_2 对甲烷置换的新方法。当水合物生产区域附近具有 CO_2 资源时,则开采的条件在经济上和运作上更为有利,美国阿拉斯加北坡即具备这个条件。

(2) 运用 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法可以减少或免除生产废水。运用降压法 (以及热注入法) 生产水合物,除分解出甲烷气体产品外,还会从水合物储层中产生较多数量的水^[2] (图 17)^[14]。这些废水必须从生产井中抽取并排除,这既需要增加设备和费用,也要考虑环境保护。而在 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法的生产过程中,水仍然主要地保留在储层内作为新形成 CO_2 水合物的组分。

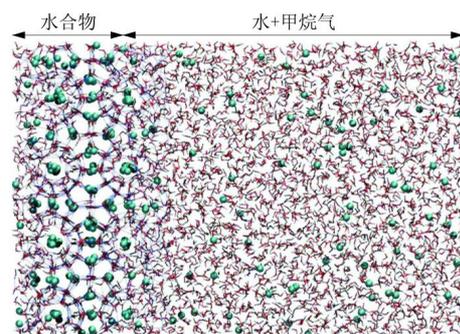


图 17 甲烷水合物分解为水与甲烷气的分子模拟

(3) 提高水合物储层的地质力学稳定性。浅层水合物储层具有较差的固结性,而水合物可提供与地层结合的机械完整性。在运用减压法生产甲烷天然气时,储层转变为砂粒和空隙气体。生产过程或许会导致储层压实,并使其上部覆盖层沉降。而运用 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法生产时,则可保持水合物储层物质的完整性和固结性,从而保持其地质力学的稳定性。

(4) 可提高水合物开采的持续性及减少附近区域钻井的堵塞。模拟研究表明,运用减压法水合物生产是吸热的,对周围会产生冷却效应,由此会产生两种弊端。一是储层温度下降阻碍水合物继续分解,将降低甲烷的采收率和生产持续性;二是降温将在地层中生成甲烷水合物或水 - 冰,造成地层孔隙充填,引起附近区域的井眼堵塞。这就降低了地层的渗透性,也使生产的持续性和采收率下降。初步研究结果表明,具有吸热和放热两种反应并存的

CO₂ - CH₄ 置换法不会出现冷却现象。因为在 CO₂ - CH₄ 置换法生产水合物的过程中, CO₂ 形成水合物所释放的热量 57.98 kJ/mol (Nagayev, 1978), 大于 CH₄ 从水合物中分解吸收的热量 54.49 kJ/mol (Rueff, 1988), 剩余的热量将有利于甲烷水合物分解的持续进行。

(5) 可在更加广泛范围的地质条件下进行水合物生产。运用减压法生产时, 投入更多的能量用以对储层降低压力和提升温度, 以促进浅层储层的分解。然而, CO₂ - CH₄ 置换法却可能对于储层的压力和温度等初始条件敏感性不高, 要求不大。因此, 这种方法能够应用到更加广泛初始条件的水合物储层中。

5.5.2 CO₂ - CH₄ 置换法水合物生产的挑战和问题

(1) CO₂ 在水合物储层中的传输能力。

CO₂ 注入水合物储层后将遇到自由水以及甲烷水合物, 通过置换过程形成的 CO₂ 水合物将进一步降低储层的渗透性及 CO₂ 继续注入的渗进能力。初步实验结果显示, 在运用置换法过程中测量到的储层渗透性的数值是保持不变的。但是, 这是一项需要继续研究的关键问题。

(2) 应扩大和量化在多孔介质中的实验。

实验和建模工作需要扩展到更大的规模, 以评估作为多孔介质参数(如颗粒和孔隙尺寸、沉积物固结程度、矿物学与岩层水地球化学)之函数的置换速率。继续研究的重点是适应于阿拉斯加北坡水合物的压力温度条件下的试验。还需要更多地研究和掌握在更大空间的范围内, CO₂ 能够渗透进入含甲烷水合物储层的可能速率。

(3) 甲烷气的采收效率。

鉴于在生产井开采区域储层内, 运用降压法理论上消耗 95% 或更多的水合物, CO₂ 将只置换笼形结构中较大的 CH₄。理论上水合物生产的置换效率为 64% (Lee et al., 2003)。在 5 个地点注入 CO₂ 置换 CH₄ 的生产方案 (White 和 McGrail, 2008) 表明, 虽然这种研究结果尚需进一步验证, 但是这个置换效率还是可以期望相对快些的。其它方面的研究表明, 运用混合气体(如 CO₂ + N₂) 注入水合物储层, 能够将甲烷采收率显著提升 到 85% (Park et al., 2006)。

(4) 开展野外规模 CO₂ - CH₄ 置换法水合物生产的可行性试验。

需要进一步实施水合物开发工程与野外规模的试采, 以确定野外现场试采方案, 包括: 钻井类型、井位布置与间隔、完井方法与储层控制参数, 等等。最后的试验研究成果将运用到阿拉斯加首次(预期 2010 年初, 实际上延迟到 2011/2012 年)水合物试采工程计划的实施中去。

5.6 美国政府积极支持科学研究机构和大学参与水合物的研究和开发

美国早就制订了国家水合物研究和开发计划, 国会通过了“甲烷水合物研究和开发 2000 法令”(The Methane Hydrate Research and Development Act of 2000)。至 2005 年 8 月, 布什总统签署“能源政策 2005 法令”(Energy Policy Act of 2005), 又将上述“甲烷水合物研究和开发 2000 法令”延长至 2010 年, 以加强美国领导和组织水合物的调查研究和开发。因此, 美国许多国家级科学研究机构和大学有机会参与水合物的研究开发。至 2006 年, 美国参加水合物研发学术机构的分布参见图 18。^[20]

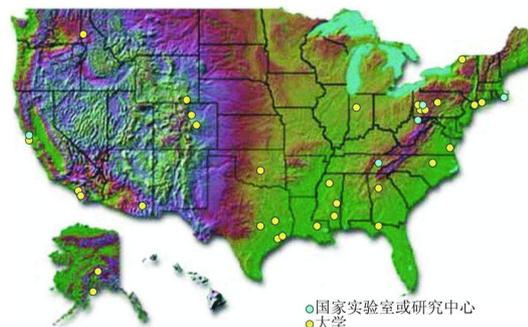


图 18 美国参与水合物研发项目的研究机构和大学(2006 年)

除上述提及美国参加水合物研究的学术机构外, 还有其它若干研究机构和大学参加。其中国家实验室有劳伦斯 - 伯克利国家实验室 (LBNL, Lawrence Berkeley National Laboratory)、橡树岭国家实验室 (ORNL, Oak Ridge National Laboratory)、洛斯 - 阿拉莫斯国家实验室 (LANL, Los Alamos National Laboratory)、爱达荷能源与环境国家实验室 (IEENL, Idaho Energy and Environment National Laboratory) 与布鲁克黑文国家实验室 (BNL, Brookhaven National Laboratory) 等, 以及美国著名的 SCRIPPS 及 Woods Hole 两所海洋研究所 (DSDP、ODP 与 IODP 重要参与机构)。美国许多大学(如 Texas A&M University、科罗拉多矿业学院、纽约州立大学、阿拉斯加大学两个分校等)也都积极参加了

水合物的研究开发工作。

美国从事水合物研究开发的人员,除科学家、工程师、教授、高级技工外,还有一批学生力量。能源部认为“学生是我们未来能源的基础,将把新的思想和视角带进能源工业”。于是 2005 年,美国能源部和国家能源技术实验室(NETL)为促进水合物的研究和开发,启动一项新的奖学金,资助博士和硕士研究生,为博士后研究提供职位。美国国家科学院(NAS, The National Academy of Sciences)和 NETL 联合创建和管理这项奖学金。至今,受益于此项奖学金从事水合物研发的学生人数已达数百人,遍及全美许多大学。

美国能源部国家能源技术实验室(NETL)是美国水合物调查研究与试采的重要力量,早在 2002 年就参与了加拿大 Mallik 的水合物试采项目。该实验室具备较强的水合物实验设施和能力。其水合物的研究室主要从事水合物建模、计算、热力学性质和动力学性质等 4 个方面的研究^[21]。水合物热力学和动力学性质主要是对人工合成水合物样品和现场样品进行测试研究。NETL 试验用人工合成水合物样品是在其 1 mL、40 mL、1 L 以及 15 L 的水合物试验观察室中形成的,图 19 为 NETL 的 15 L 高压水合物合成试验观察室^[22]。图 20 为在 1 L 合成小室中制成的水合物样品。

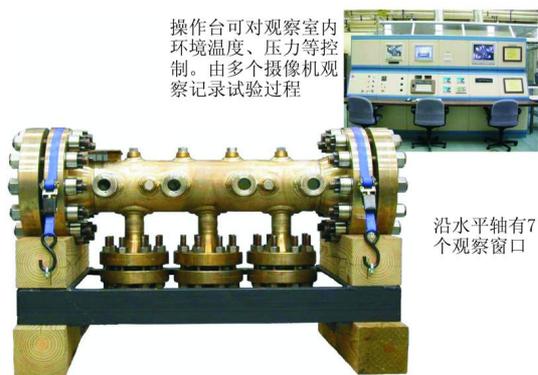


图 19 美国 NETL 实验室 15 L 高压水合物合成试验观察室



图 20 美国 NETL 实验室 1 L 合成小室中制成的水合物样品

6 阿拉斯加北坡 Ignik Sikumi #1 井运用 CO₂ - CH₄ 置换法水合物试采成功

6.1 项目参加国家与机构

美国能源部(DOE)、康菲石油公司与日本国家石油、天然气与金属公司(JOGMEC)等。

6.2 2011 年 Ignik Sikumi #1 试验井钻井、完井作业及成果^[23]

6.2.1 钻井与井下安装作业

6.2.1.1 钻探施工

2011 年 4 月 5 日, Nordic - Calista #3 型钻机运抵试验井临时冰垫工地(500 ft × 500 ft, 参见图 21)。4 月 9 日开钻, 上部井段采用水基泥浆钻进并随钻测井(LWD), 直至 1482 ft 深度; 下 10 3/4 in 表层套管、注水泥; 进行压力测试。下部钻进运用低温油基泥浆并继续随钻测量, 直至水合物储层。于 4 月 17 日钻至 2597 ft (1 ft = 304.8 mm, 下同) 深度(图 22)。



图 21 阿拉斯加北坡 Ignik Sikumi #1 井水合物试采工地 (据 CONOCOPHILLIPS)

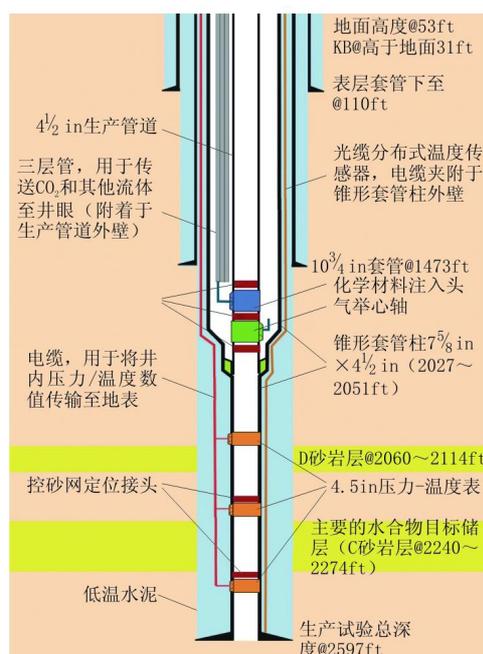


图 22 Ignik Sikumi #1 试验井井身结构与井下器具安置

生产套管外套有三层管(灰色)提供 CO_2/N_2 及其它流体通过。

共有两个水合物储层(黄色):D 含水合物砂岩储层,628 ~ 644 m;C 含水合物砂岩储层,683 ~ 693 m。

井深 791.6 m(2597 ft), \varnothing 114.3 mm(4.5 in) 生产套管。

6.2.1.2 测井

进行整套常规电缆测井,包括伽玛射线、电阻率、高分辨率密度、中子孔隙度、油基泥浆成像、组合磁共振、声扫描仪及钻孔电阻率扫描仪等。

6.2.1.3 井下绳索压力测试

运用 Schlumberger 公司的快速压力测量器(XPT, Express Pressure Tool)和组合式地层动态测量仪(MDT),对试验井实施一系列的短期压力测试。

6.2.1.4 安置井下整套仪器锥形套管柱

包括井下温度和压力表(3只,橙色),以及连续分布式温度传感器(DTS)光缆(褐色)。在灌注水泥作业期间,这些仪器均发挥监测功能。至4月25日,完成上述各项工作。

6.2.1.5 试验井上段安装作业

包括井下安置化学材料注入轴(蓝色)和气举心轴(绿色)等作业。此后试验井悬置着,等待2012年进行水合物生产试验。

6.2.2 2011年 Ignik Sikumi #1 试验井阶段成果

(1)圆满完成 Ignik Sikumi #1 试验井钻井和完井作业任务,为2012年水合物正式试采做好准备。

(2)钻探和电缆测井数据表明,发现 Ignik Sikumi #1 试验井下部4个预期的含水合物的水平砂岩层段。主要的试采目标为 Sagavanirktok 上部“C”砂岩层(井深2240 ~ 2274 ft),含有34 ft(10.4 m)厚高水合物饱和度的清纯、高孔隙度的砂岩;第二个试采目标是其上部的层位“D”砂岩层(2060 ~ 2114 ft),包含49 ft(15 m)水合物饱和度稍低的略带泥质的砂岩;此外,较浅的“E”砂岩层(1920 ~ 1954 ft)和更深的“下部C”砂岩层(2278 ~ 2362 ft)都分别含有不同饱和度的水合物。

6.3 2012年 Ignik Sikumi #1 试验井水合物试采工程圆满成功^[24]

该试验井水合物试采主要运用 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法(参见图23),并藉助井内喷射泵辅助降低储层压

力,促进水合物的分解,实施甲烷气体生产。

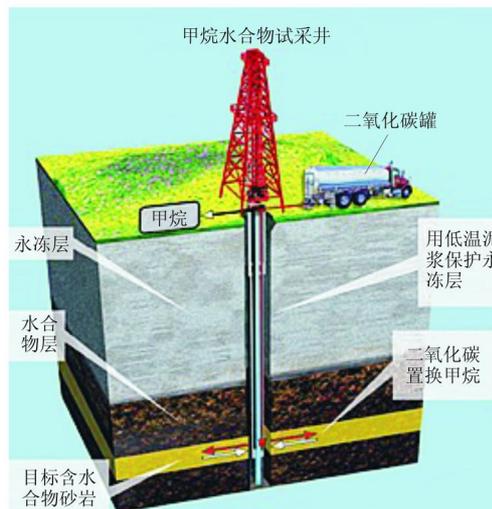


图23 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法水合物开采示意

6.3.1 水合物试采工程前的准备工作

Ignik Sikumi #1 试验井水合物的正式试采工程始于2011年12月。

2012年1—2月期间,康菲公司在工地安装 CO_2/N_2 置换法生产试验所需设备的定位和安装,将注入泵、气罐和测量仪表与试验井井口相连接,并重新循环流体以确认生产试验井机械上的整体功能;然后将 CO_2 (23%)和 N_2 (77%)的混合物注入井内以替换原有流体;为防止破坏铺设固定于套管外侧上的压力/温度测量仪和光缆,运用陀螺测斜仪定向地将射孔器下放至井内^[25],按6 in的间隔在30 ft套管的生井段射孔;将滤砂网(图24)下至射孔井段,以防止生产过程中砂粒进入井内。



图24 防止地层砂粒进入生产试验井的防砂网

6.3.2 向 Ignik Sikumi #1 试验井下注入 CO_2/N_2 混合气体

2月15—28日,将 798823 m^3 (28210000 ft^3) 含

有少量化学示踪剂的 CO_2/N_2 混合气体,成功地注入地层。正如本文上述 5.5.2(3) 中曾提到, CO_2/N_2 混合气体要比单纯 CO_2 更能增强 CO_2 与自然界甲烷水合物的置换作用。操作中缓慢而平稳地提高注入速率,未发现地层压裂。一旦注入混合气体达到计划用量,关井并重新布置施工现场,以实施水合物试采甲烷气体返排作业。

6.3.3 Ignik Sikumi #1 试验井水合物试采

(1) 3 月 4 日,打开试验井,在其自身能量作用下,产出气体混和物约 1 天半时间;安装井下喷射泵。

(2) 以后 7 天内,通过泵出井中的流体,使射孔井段的压力降低,从水合物储层中抽吸出流体,便实现了水合物生产。在此期间,Ignik Sikumi #1 井以变化较大的速率生产出甲烷气体和水(图 25)。此外,试采作业逐渐减缓,停歇了 2 天修理地面气水分离器的阀门。

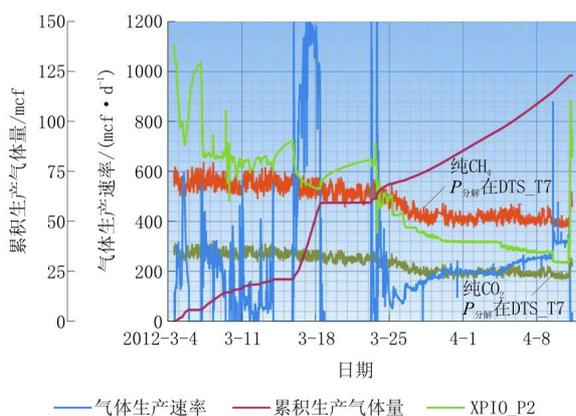


图 25 2012 年阿拉斯加 Ignik Sikumi #1 井水合物试采期间气体产出曲线

(3) 3 月 15 日,以降低甲烷水合物稳定性为目的的喷射辅助生产重新开始。在此生产试验期间,储层水合物成功地开始分解,气体生产率猛增。生产继续 2 天半之后,关井以减缓在输送甲烷气体管线中形成冰塞,同时更换降低井下压力的喷射泵。

(4) 3 月 23 日,生产试验重新开始,Ignik Sikumi #1 井连续生产气体 19 天,图 26 为生产出的甲烷气体在夜空中燃烧。连续试采直至 4 月 11 日最后关井。此后,对生产试验井封闭并废弃。

总之,在这 38 天的试验阶段的 30 天生产时间内,总共累积生产甲烷气体 28317 m^3 (1000 mcf , 图 25 中暗红线),平均日产气量 944 m^3 (蓝线)。



图 26 阿拉斯加 Ignik Sikumi #1 井水合物试采的甲烷气体在夜空燃烧

7 总结与建议

(1) 美国是世界上水合物资源最丰富的国家之一,同时也是能源需求大国与科技强国。美国水合物调查研究不仅局限其本土,而如同其政治、军事一样,具有“全球战略”,它积极参与其它国家和地区的水合物调查,如加拿大、中美海域、印度、韩国等,并与日本签订合作协议。美国政府至少有 7 个机构(能源部 DOE、地质调查局 USGS、矿产管理局 MMS、海军研究办公室海军研究实验室 NRL、土地管理局 BLM、国家海洋和大气管理局 NOAA 和国家自然科学基金会 NSF)参与统筹协调天然气水合物研发事务。

美国有许多国家实验室、研究中心和大学,以及石油企业参加天然气水合物的研究开发。鉴于水合物的研发直到市场化的长期性、艰巨性,任重道远,美国能源部专设奖学金,积极培养和准备未来的水合物研发人才。除海域水合物试采技术外,在水合物研究和调查评价综合实力方面,从基础理论、实验模拟,到三维地震测量、保压取样、以及水合物保压状态下的测试分析技术(GHASTLI、PCCT、IPTC 等),美国处于国际领先水平。

(2) 阿拉斯加北坡 Ignik Sikumi #1 井天然气水合物试采项目是在美国能源部领导下,由能源部及其能源技术国家实验室(NETL)组织实施,有美国地质调查局(USGS)、西弗吉尼亚大学等学术机构参加,由康菲石油公司负责工程施工,并联合曾参加过加拿大 Mallik 水合物试采工程的日本国家石油、天然气和金属公司(JOGMEC),运用创新的 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法成功地实施了水合物试采。至此,美国与日

本和加拿大并驾齐驱,成为世界上在陆域永冻带试采水合物技术领先的国家。

(3)阿拉斯加北坡 Ignik Sikumi #1 井天然气水合物试采工程表明,CO₂ - CH₄ 置换法应用于水合物开采,其气体生产率和工程经济性尚需进一步研究提高。2012 年美国在阿拉斯加运用 CO₂ - CH₄ 置换法试采日产气量约为 944 m³,比 2008 年加拿大 Mallik 运用降压法试采日产气量 1912 m³[2] 要低。其客观因素可分析为,产气率可因不同地域水合物的地质条件,如水合物类型、丰富程度、饱和度,以及地层孔隙度、渗透率等诸多参数的差异而不同,现尚不宜仅以此两次试采效果对两种试采方法产气率的优劣下结论。但是,美国阿拉斯加 2012 年的水合物试采,是首次运用 CO₂ - CH₄ 置换法,工程施工中所运用的方法、技术、工艺以及设备、器材等方面,对于提高气体生产率肯定还有许多值得改进提高之处。

至于试采工程经济性,CO₂ - CH₄ 置换法要消耗大量化学材料(CO₂、N₂),而且在地面需要安置相应特殊设备(如运用 CT 连续管装置更换井内流体),这就将增加施工成本。但是,对于某些已查明附近具有 CO₂ 资源的水合物开采工地,就地取材,就可以使开采成本大为降低。而阿拉斯加北坡的水合物开采恰恰具备这个条件。

(4)CO₂ - CH₄ 置换法开采水合物具有多方面优越性。

①CO₂ 与水有更强的化学亲和力,置换法是 CO₂ 分子将 CH₄ 分子从水合物中“排挤”出去,取而代之,与水结合生成更加稳定的 CO₂ 水合物。这就将减少或免除生产废水,既减少环境污染,又减少废水处理工序和费用。更重要的是,在水合物开采过程中及之后,更加稳定的储层将显著地降低海底滑坡与塌陷,以及甲烷气体大量泄漏的可能性。

②减少或免除生产废水的另一优点,是可以明显地降低储层中砂粒受水冲刷或携带进入生产套管的机率,能够减少井内故障与井下设备器具的维修,从而可以保障较高的生产效率,以及气体生产的持久性。阿拉斯加首次在 Ignik Sikumi #1 井水合物试采持续时间达 30 天,即体现了 CO₂ - CH₄ 置换法的这一优点。

③CO₂ - CH₄ 置换法具有吸热和放热两种化学反应并存的特点,CO₂ 形成水合物所释放的热量大于 CH₄ 从甲烷水合物分解吸收的热量,则总的效应

是释放热量。这种剩余热量就相当于热注入法向生产井内储层增加热量,促进甲烷水合物的继续分解,从而有利于增强水合物开采的持续性,提高气体开采的产量。

④CO₂ - CH₄ 置换法还具有因对于水合物储层的压力、温度等初始条件敏感性不高、要求不大,因而可在更加广泛的地质条件下实施水合物生产。这种方法还具有减少水合物开采工地附近其它钻井堵塞等优点。

(5)分布于世界各地天然气水合物的类型、地质赋存条件、地形地理状况等多种多样,而且国际上和各国对不同水合物开采矿区的环境要求的严格程度也是各不相同。所以,各国在调查并开采水合物时,难免会遇到水合物蕴藏既十分丰富,但地质灾害发生的可能性又很大的地(海)域。在这种情况下,开采水合物方法的唯一选择,也许就是选用 CO₂ - CH₄ 置换法了。因此,在目前作为简便、经济的降压法已多次成功应用于水合物开采的情况下,仍需“两(多)手准备”,应该加强 CO₂ - CH₄ 置换法在基础理论、实验模拟研究,特别是野外水合物生产试验,成功地掌握 CO₂ - CH₄ 置换法,以满足未来的需要。

参考文献:

- [1] USGS Leads United States Effort in Mallik Well. Announcement [J] Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter, Vol. 2, Iss. 1. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [2] 左汝强,李艺.加拿大 Mallik 陆域永冻带天然气水合物成功试采回顾[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(8):1-12.
- [3] Design and Operation of a Wireline Pressure Core Barrel. DSDP Development Engineering Technical Report No. 16. SCRIPPS Institution of Oceanography, University of California at San Diego. <http://www.deepseadrilling.org>.
- [4] Pressure Core Sampler(PCS), Coring Methods, Engineering and Science Operations, <http://www.odp.legacy.org>.
- [5] ODP Leg164. Preliminary Report. <http://www.odp.tamu.edu/>.
- [6] Cascadia Margin Gas Hydrates. IODP Expedition 311 Preliminary Report, IODP Publication. <http://www.iodp.org>.
- [7] Y. Kubo, Y. Mizuguchi, F. Inagaki, and K. Yamamoto. A new hybrid pressure-coring system for the drilling vessel Chikyu. Scientific Drilling, Volume, 17, 2014. <http://www.sci-dril.net/17/37/2014/>.
- [8] Larry Obee, John Firth, Texas A&M University. US DOT APPROVES PRESSURE VESSELS FOR TRANSPORTATION OF PRESSURIZED HYDRATE CORE. Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter, Vol. 3, Iss. 3. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.

- [9] HOT ICE #1: FIRST DEDICATED HYDRATE RESEARCH WELL IN ALASKA Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter, Vol. 3, Iss. 2. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [10] Barry Freifeld. YOU SEE ICE-WE SEE GAS HYDRATES. Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter, Vol. 3, Iss. 4. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [11] The "Mount Elbert" Science Team. Alaska North Slope Successful Cores, Logs and Tests Gas-hydrate-bearing Reservoirs. Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter. Vol. 7, Iss. 1. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [12] Beaudoin, Y. C., Waite, W., Boswell, R. and Dallimore, S. R. (eds), 2014. Frozen Heat: A UNEP Global Outlook on Methane Gas Hydrates. United Nations Environment Programme. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [13] Ray Boswell, Tim Collett, Scott Dallimore, et al. Geohazards Associated with Naturally-Occurring Gas Hydrate. Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter. Vol. 12, Iss. 1. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [14] Brian Anderson, Kenneth Jordan. The Role of Molecular Level Modeling in Gas Hydrate studies. Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter. Vol. 9, Iss. 2. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [15] Alan Rempel, Julia Irizarry, Brandon Vanderbeek, et al. Hydrate Evolution in Response to Ongoing Environmental Shifts. Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter Vol. 17, Iss. 1. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [16] Pete McGrail, Tao Zhu, Bob Hunter. NEW METHOD MAY HOLD PROMISE FOR GAS HYDRATE PRODUCTION AND CARBON SEQUESTRATION. Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter. Vol. 5, Iss. 1. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [17] ConocoPhillips University of Bergen Hydrates Team. Laboratory Investigation of Hydrate Production through $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ exchange. Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter, Vol. 8, Iss. 4. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [18] 陈月明,李淑霞,郝永卯,等.天然气水合物开采理论与技术[M].山东东营:中国石油大学出版社,2011.
- [19] Helen Farrell, Ray Boswell, James Howard, et al. $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ exchange in natural Gas Hydrate Reservoirs: Potential and Challenges. Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter, Vol. 10, Iss. 1. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [20] DOE Announces New Fellowship program Dedicated to methane Hydrate Research. Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter, Vol. 6, Iss. 2. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [21] [美] T. 科利特, A. 约翰逊, C. 纳普, R. 博斯维尔. 天然气水合物——能源资源潜力及相关地质风险[M]. 北京:石油工业出版社,2012.
- [22] Charles E. Taylor. LARGE-VOLUME, HIGH-PRESSURE VIEW CELL HELPS FILL GAPS IN UNDERSTANDING OF METHANE HYDRATE BEHAVIOR. Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter, Vol. 4, Iss. 3. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [23] David, Schoerbek, Ray Boswell. Ignik Sikumi #1, Gas Hydrate Test Well, Successfully Installed on the Alaska North Slope. Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter, Vol. 11, Iss. 1. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [24] Exchange Trial Project Team. Ignik Sikumi Gas Hydrate Field Trial Completed. Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter, Vol. 12, Iss. 1. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [25] 2012 Ignik Sikumi Gas Hydrate Field Trial. Gas Hydrate. www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas.
- [26] Field data from 2011/2012 ConocoPhillips-JOGMEC-DOE Ignik Sikumi Gas Hydrate Field Trial Now Available. Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter, Vol. 13, Iss. 1. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [27] 曾繁彩,杨胜雄,张光学,等.天然气水合物资源勘探开发战略研究[M].北京:地质出版社,北京,2013.
- [28] Bp-doe cooperative alaska gas hydrate research project Update. Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter, Vol. 6, Iss. 1. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.

致谢:本文大部分参考文献取自美国能源部(DOE,US)下属国家能源技术实验室(NETL)所办“冰中之火-气体水合物通讯”(Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter)期刊。该NETL为美国水合物研究和开发的重要机构,参与组织并实际参加过美国及加拿大等国家的水合物调查评价和水合物试采工程。其“Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter”期刊广泛、及时地刊载世界各国,特别是美国天然气水合物研究、调查和试采活动,其内容具体、翔实,图文并茂。本文参考了该期刊2002—2017年期间约20篇文章,以及其他相关文献(DSDP、ODP、IODP等)。在本文撰写结束之际,笔者对美国NETL的Fire in The Ice-Gas Hydrate Newsletter期刊及其各相关文章的作者,以及其他国内外参考文献的网站、书籍的作者和译者表示深切的谢意。