

加拿大 Mallik 陆域永冻带天然气水合物成功试采回顾

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:1998年由加拿大地质调查局和日本国家石油公司领导,在加拿大麦肯齐三角洲永冻带实施的 Mallik 2L-38 水合物研究井的项目是成功的。但是,由于气候变暖和机械故障,水合物试采目标未能完成。加拿大地质调查局和日本国家石油公司与其它8个国际合作机构于2002年回到 Mallik,钻进了3L-38和4L-38两口观测井,以及5L-38生产试验井。在5L-38井中采取了水合物岩心(采取率90%)并进行物探测井等研究,实施了2次短时生产试验——运用MDT的降压法与热注入法的试验。运用热冲洗液循环的热注入法获得了470 m³的气体产量。此后,2007—2008年又重返于1998年钻成的2L-38井,对其进行加深、扩孔、下套管等,用于实施水合物试采。2007年,在此试验井内储层射孔井段安置潜水泵,抽水降低水位以减小储层压力,在12.5 h的降压试验期间产生830 m³的气体。试验证明,即使在如此短的时间内,降压法也是有效的。2008年在2L-38井6.8 d(139 h)的长时间试采过程中,持续产气2000~4000 m³/d,总共产量达13000 m³。此次试采数据表明,降压法对于水合物生产是一种正确可取的方法。2008年加拿大 Mallik 天然气水合物试采项目的成功,是世界水合物研究和开发史上的一座里程碑。

关键词:永冻带;天然气水合物;甲烷;水合物试采;热注入法;降压法;总产气量

中图分类号:TE37 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)08-0001-12

The Review of Mallik NGH Successful Production Tests in Canada's Permafrost Zone/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: The 1998 Mallik 2L-38 Hydrate Research Well Program in Canada's Mackenzie Delta, permafrost area, led by the GSC and the Japan JNOC, was successful, but the goal of producing from NGH was not accomplished for the warming weather and mechanic failure. GSC and JNOC, as well as other 8 partners returned to Mallik in 2002. Three wells—the 3L-38 and 4L-38 observation wells, and the 5L-38 production well were drilled. Gas hydrate core was gained from the 5L-38 well at 90% core recovery and geophysical studies were conducted. Two short-duration production tests were conducted—a depressurization test with MDT tool and a thermal injection test. One encouraging result was the 470 m³ of gas production by a thermal injection technique employing hot fluid circulation. Then, for the 2007—2008 Mallik production test program, the 2L-38 well, drilled in 1998, was modified to establish a production test well by reaming, deepening, casing, and cementing. An ESP was set below the perforation zone to depressurize the formation by dropping the water level in 2007. During 12.5 h of the test, at least 830 m³ of gas flow was obtained. The test results verified the effectiveness of the depressurization method even for such a short duration. The 2008 testing program at Mallik confirmed that continuous gas flow ranging from 2000 to 4000 m³/day was maintained throughout the course of the 6.8 day (139 hour) test. Cumulative gas production volume was approximately 13000 m³, which data confirms that the depressurization method is the correct approach for gas hydrate production. The 2008 Mallik gas hydrate production program was a landmark in hydrates R&D in the world.

Key words: permafrost zone; Natural Gas Hydrate (NGH); methane; hydrate production test; thermal injection method; depressurization method; cumulative gas production volume

0 引言

天然气水合物(NGH, Natural Gas Hydrates)是一种高效清洁能源,其燃烧产生的能量比同等条件下煤、石油、天然气产生的多,污染却比这些常规燃

料要小得多。天然气水合物资源丰富,据估算,世界天然气水合物总量相当于全球已探明煤、石油、天然气等常规(化石)能源总量的2倍。由于天然气水合物具有能量密度高、分布广、规模大、埋藏浅、成藏

收稿日期:2017-07-11

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。

物化条件优越,且产生的天然气能满足能源、经济、环境和效率需要等特点,是未来较理想的替代能源,具有重要的战略意义和巨大的经济价值,正受到各国政府和科学家的重视。

然而,由于其特殊的性质,天然气水合物是油气资源中开采技术难度最大、投资成本最高、收益最低

的一种,海域水合物开采更具有巨大的资金和灾害风险,是世界级难题。因此,世界上许多发达国家和发展中国家都将水合物的研究和开发利用列入国家重点发展战略,并投入巨资进行资源调查和开采技术研究。目前,世界上已调查发现并圈定有天然气水合物的地区分布情况见图1^[1]。

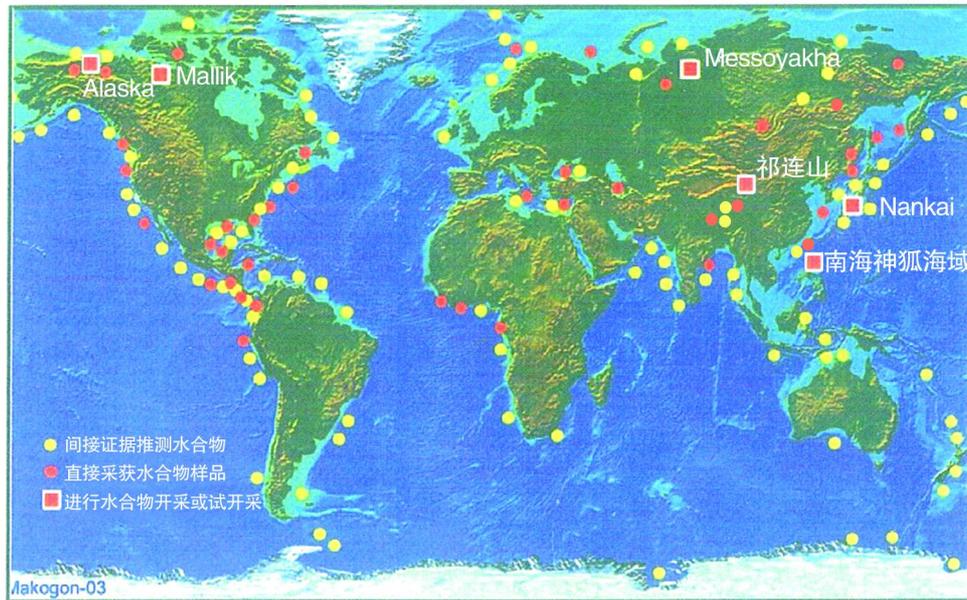


图1 世界上已发现和推测的天然气水合物分布示意图(据 Makogon, 2010, 2017年笔者补充)

世界上首次试采天然气水合物的国家是前苏联。1970年代,苏联在西伯利亚麦索雅哈(Messoyakha)运用降压法和抑制剂注入法试采水合物。之后,加拿大、美国、日本也先后实施了天然气水合物的钻采工程试验,并取得了重要进展。2017年5—7月,我国在南海神狐海域天然气水合物试采取得圆满成功,连续试采60 d,累计产气30.9万 m^3 ,此次试采获得了持续产气时间最长、产气总量最大、气流稳定、环境安全等多项重大突破性成果,创造了产气时间和总量的世界纪录,使我国海域天然气水合物的试采技术水平目前处于世界领先水平。这一历史性的突破,使社会各界对天然气水合物开采的关注度提到了前所未有的高度,人们对这种新能源的早日商业化开发寄予了希望。

本文将重点对加拿大Mallik永冻带天然气水合物的试采工程进行回顾,可供有关人员今后工作的参考。

1 前苏联西伯利亚麦索雅哈(Messoyakha)气田天然气水合物的开采^[2]

苏联也是研究天然气水合物最早的国家。早在

20世纪30年代,在极度寒冷的西伯利亚的油气管道中发现因低温导致天然气与水结合形成的水合物,堵塞了油气管道(参见图2)。为此,苏联科学家为疏通管道,使之畅通,开始对水合物的结构和形成条件开展了研究,并逐步实施调查评价。



图2 天然气水合物堵塞了油气管道

麦索雅哈的天然气水合物藏发现于20世纪60年代末,是在对其下方的一个天然气田进行开采时无意中发现的。该气田位于前苏联西伯利亚西北部,在这里首次对天然气水合物藏进行商业性试采。水合物开采方法主要是采用降压法,后期采用结合化学抑制剂(甲醇、氯化钙等)的方法。

该地区由于下方常规天然气的开采使得下部天然气水合物的孔隙压力降低,导致天然气水合物分解并进入气田,保障了长期持续稳定的生产。该气田 1970—2004 年水合物藏的开采表现有如下特点(参见图 3)^[3]。

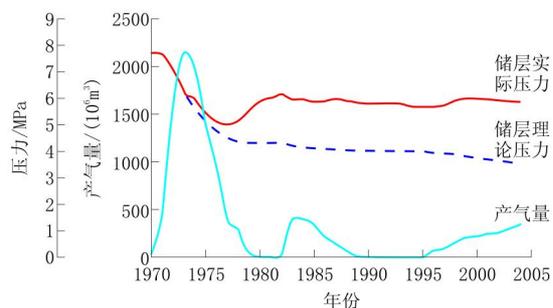


图3 麦索雅哈气田开发过程中的产气量和储层压力变化曲线(根据 Makogon et al., 2007 修改)

(1) 孔隙气体压力变化: 天然气水合物藏井位附近的孔隙气体压力在采气初期, 气藏压力由约 8 MPa, 经过 7 年左右的时间, 降低到约 5 MPa, 而后的 5 年时间内, 又回升到 6 MPa 左右, 直到 2004 年基本保持恒定;

(2) 气田开采的产气量在开采初期保持很高的采收率, 自 1982 年以来, 虽然产气量有所变化, 但气田压力基本保持恒定, 主要是由于产气量与天然气水合物分解出的天然气量相持平所致。据估算, 截止到 2004 年 1 月 1 日, 麦索雅哈气田累计产气量的 50% 以上是天然气水合物分解的产物。

麦索雅哈气田天然气水合物藏的发现与开采, 使人们首次认识到天然气水合物可成为一种天然能源, 从此拉开了天然气水合物作为能源研究的序幕。

这是目前世界上首次对天然气水合物藏实施开采应用的实例。

2 1998 年加拿大 Mallik 2L-38 井首次水合物钻探试采工程^[4]

1972 年加拿大帝国石油公司在麦肯齐 (Mackenzie) 三角洲钻了两口勘探井, 在其中之一 Mallik L-38 井永冻层下 800 ~ 1100 m 钻遇了水合物。1982 年, 绘制了该地区天然气水合物分布图, 并汇总了 859 口油井测井数据, 结合地质和地温等数据, 于 1993 年制成数据库。

1992 年, 在其北极圈永冻层的科学探井中, 首次采集到天然气水合物样品。1993 年, 于大洋钻探

计划 (ODP) 146 航次中, 在温哥华海域又发现水合物赋存。至 1998 年, 加拿大开始与日本和美国开展合作, 在加拿大水合物聚集的麦肯齐三角洲的 Mallik 地区, 首次实施了天然气水合物的钻采工程试验。

2.1 Mallik 2L-38 井概况

Mallik 2L-38 号天然气水合物试验井位于加拿大西北的麦肯齐三角洲如图 4 所示。该井位于 1972 年所钻 Mallik L-38 井北面 100 m, 距离项目指挥和研究中心依努维克镇约 200 km, 沿麦肯齐河建有冰道, 便于两地运输物资器材。

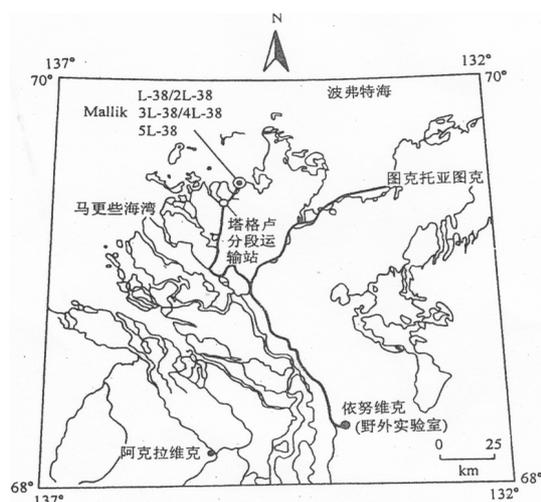


图4 Mallik 井位及冰道路线

2.2 Mallik 2L-38 试验井目标任务

(1) 对 Mallik 地区永冻带的天然气水合物进行深入的地质调查和评价, 并对天然气水合物作首次开采试验。

(2) 针对日本于 1999 年对其南海海槽进行的水合物开采试验作准备。预先对其 PTCS 保温保压取样钻具、KCl 低温泥浆、水合物分析测试技术等进行实际验证和评价。

2.3 项目实施国家与机构

Mallik 2L-38 井水合物钻探试采项目主要由日本、加拿大的三个机构联合实施: 加拿大地质调查局 (GSC, 负责科学研究)、日本国家石油公司 (JNOC)、日本石油资源开发公司加拿大勘探公司 (JAPEX, 负责钻采工程施工)。美国地质调查局 (USGS) 也参加了该项目。

2.4 Mallik 2L-38 井钻探施工作业概要

Mallik 2L-38 井井身结构如图 5 所示。采用

Shehtah 公司的 Rig 7E 型钻机施工,钻探施工现场布置如图 6 所示。

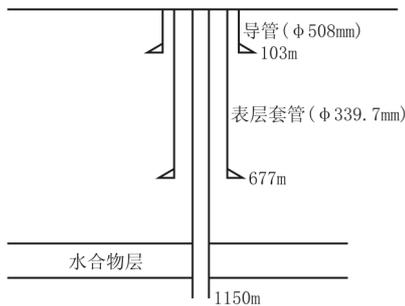


图 5 Mallik 2L-38 井井身结构示意图

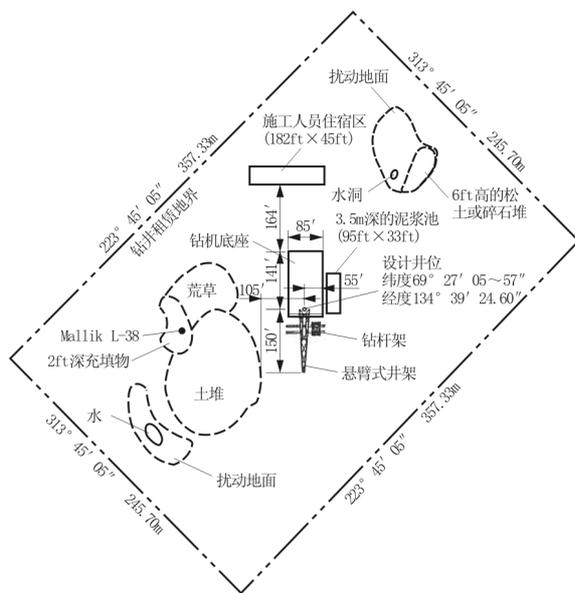


图 6 Mallik 2L-38 井钻场平面布置示意图

1998年2月16日开钻,3月22日钻至1150 m 深度终孔,3月28日施工任务完成,历时39天。

在从地表到687 m的孔段当中,0~640 m 永冻层范围内共进行了8个取心回次。在孔深钻到687 m之后,下入外径为340 mm的技术套管,然后将主孔钻进到1150 m终孔,期间共取心16次。24个取心回次的取心效果及所用取心钻具等见表1。钻探施工中采用经过冷却处理的KCl聚合物泥浆和商标名为Drilltreat的泥浆添加剂,成功地抑制住了岩心内天然气水合物的分解和岩粉沉淀的产生。钻进施工过程中没有发生严重的孔内事故或其他钻进事故。不过,由于天气提前变暖以及钻机陈旧和起重机机械故障造成了延期,使得原计划的水合物试采被迫取消。在主孔的取心还算成功,使得4种不同的取心钻具都得以评价和验证。从896~952 m孔段的不同

沉积层中取出了含有天然气水合物的岩心(图7)。

由日本石油公司开发技术中心委托美国 Aumann & Associates 公司设计和制造的 PTCS 保温保压取样器首次在 Mallik 2L-38 井的钻探施工中试用,该钻具采用单动双管绳索取心和回收式取心方法。PTCS 取心器的基本结构如图 8 所示^[5]。第一次下井钻进从 886~889 m,采取水合物岩样 1.05 m;第二次钻进从 889~890 m,采取岩样 0.1 m。两次水合物取样均因取样器球阀未能关闭,没有获得保压的样品。

PTCS 保温保压取样器在此次试验中效果并不令人满意。后于 1998 年 12 月又在日本柏崎试验场作了验证试验,在井深 207~219 m 井段进行了 4 次取心钻进,成功率稍有提高,但仍未达到预期效果。

2.5 Mallik 2L-38 井钻采工程项目评价

(1) 日本能源奇缺,油气主要依靠进口。而其周围海域却富藏水合物,但海域开发难度很大,风险极高,宜采取“先陆后海”试采策略。然而其国内又无永冻层水合物,只能借助外国条件。

加拿大不缺油气资源,还向美国出口大量油砂等。其北部陆地与北冰洋大陆架水合物量大面广,迟早要开发;而且其西北高寒地区的社会和居民所需取暖与照明燃料还是当地解决为好;针对北极地区生态环境极其脆弱,开发使用水合物这种清洁能源,也是最佳选择。日本急于为其 1999 年南海海槽水合物试采作技术准备,欲在加拿大 Mallik 陆域先行作开采试验,愿提供工程技术和资金,这对两国岂不互利双赢。这次两国的合作,并延伸到 2002 和 2008 年,奠定了陆地水合物两次成功试采的基础,提高了国际开发水合物的热情和信心。

(2) 1998 年 Mallik 钻采项目虽因气候变暖和机械设备故障未能实施水合物试采,但仍然取得以下重要成果和收获。

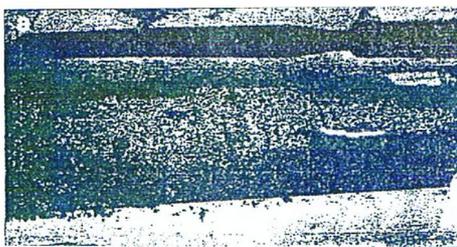
① 通过钻探取心和测井,进一步搞清地质和水合物赋存情况,为以后成功试采打下基础;

② 为日本 PTCS 保温保压取样器下一步的试验改进提供了依据。此后,日本国家石油、天然气和金属公司(JOGMEC)研发出第二代水合物保温保压取样钻具——JOGMEC PTCS,性能有所提高,应用于南海海槽水合物调查之中。

③ 此次钻探采用的 KCl 聚合物泥浆体系,在井下能维持 1~3 ℃ 的低温,有效地抑制了水合物分解

表 1 Mallik 2L-38 井钻探取心回次记录

序号	取 心		钻 头				取心钻具类型	深度/m		进尺长度/m	平均钻速/(m·h ⁻¹)	钻 压/kN	转 速/(r·min ⁻¹)	流 量/(L·min ⁻¹)	取 心		岩心捞取器类型			
	取心回次	规格/in	类型	系列号	TFA/in ²	岩心直径/in		下钻深度	提钻深度						取心长度/m	取心率/%				
1	3	8½						105.0	114.0	9	12.00	20	60	0.669	4.50	50				
2	3	8½						114.0	123.0	9		20	65	0.780	0.00	0				
3	3	8½						123.0	132.0	9	20.77	30	60	0.930	0.00	0				
4	3	8½	AUC435	0321943	0.810	2	CoreDrill型	132.0	141.0	9		30	60	0.780	0.00	0	普通或			
5	3	8½						142.0	151.0	9	31.76	30	60	0.665	0.00	0	舌阀型			
6	3	8½						151.0	156.0	5		30	60	0.445	0.00	0				
7	RR3	8½						156.0	165.0	9	30.00		50	0.660	0.00	0				
8	RR3	8½						167.0	176.0	9		20	50	0.357	5.00	56				
															68.0			9.50	20.6	
9	RR3a	8½	AUC435	0321943	0.810	2	CoreDrill型	790.0	799.0	9	7.30	20	60	0.820	0.00	0	普通或			
10	RR3a	8½						790.0	803.0	4		30	60	0.554	0.00	0	舌阀型			
11	11	7%	C22B	06150	0.500	3½	普通型	816.0	825.0	9	12.00	50	65	0.512	0.00	0	同上			
12	12	10%	ARC412	1901941	1.200	2%	PTCS型	886.0	889.0	3		20~50	70	0.800	1.05	35	普通型			
13	13	10%						889.0	890.4	1.4		20~40	70	0.800	0.10	7				
															4.4			1.15	26.1	
14	13	9%						890.4	896.6	6	10.59	30~80	60~70	0.923	3.80	63				
15	RR13	9%	ARC412	0119932	1.000	5¼	普通型	896.4	901.2	4.8		20~80	60~75	0.820	4.30	90	岩心抓簧型			
16	RR13a	9%						901.2	902.0	0.8	0.43	20~80	50~70	0.820	0.45	56				
17	RR13b	9%						902.0	902.6	0.6		20~80	50~120	1.025	0.30	50				
															12.2			8.85	72.5	
18	14	7%	ARC412	0119610				902.6	911.6	9	7.20	20~50	60	0.820	4.65	52				
19	RR14	7%	ARC412	0119610				911.6	919.0	7.4		20~50	50~80	1.025	3.30	45				
20	RR14a	7%	ARC412	0119610				919.0	925.4	6.4	6.40	20~50	60~80	0.820	3.80	59				
21	RR14b	7%	ARC412	0119610	0.500	3¾	普通型	925.4	926.7	1.3		20~50	50	0.820	1.20	92	岩心抓簧型			
22	15	7%	C201	0601942				926.7	935.7	9	3.00	20~50	60~70	1.025	2.60	29				
23	RR15	7%	C201	0601942				935.7	943.6	7.9		20~50	75	0.800	3.20	41				
24	RR14c	7%	ARC412	0119610				943.6	952.6	9	2.40	20~50	60	0.615	8.55	95				
															50.0			27.30		



(a) 充填于90.4m深处未胶结砂岩砂粒间孔隙中的天然气水合物(<math>< 2\text{mm}</math>)



(b) 充填于913.7m深处砂岩砂粒间孔隙中的大块天然气水合物结核(<math>< 2\text{cm}</math>)

图 7 Mallik 2L-38 井取出的天然气水合物样照片^[6]

及防止岩粉沉淀,为后来的 2002、2008 与 2013 年水合物钻井试采所借鉴运用。

④2008 年水合物试采工程是重返此次的 2L-38 试验井,对其扩孔并延深加以再利用,节约了大量资金,缩短了施工时间,并减少了环境污染。

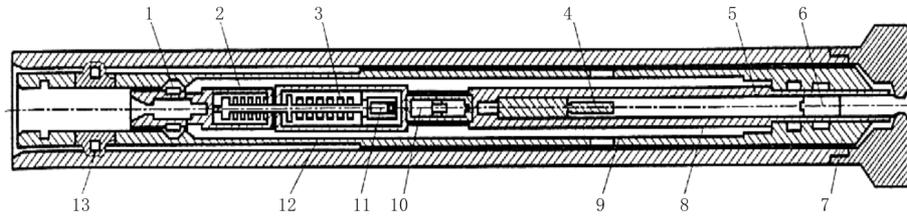
3 2002 年初加拿大 Mallik 5L-38 井运用热注入法水合物试采成功

3.1 目标任务

通过钻井实施水合物试采工程作为主要目标,同时开展水合物地质、地震、测井、地热、地球化学、微生物,以及工程地质等研究。

3.2 项目实施国家与机构^[7]

2002 年 Mallik 5L-38 井水合物试采联合了更多的国家、机构参与,主要是 5 个国家的 10 个国际机构:加拿大地质调查局(GSC)、日本国家石油公司(JNOC)、日本石油资源开发公司加拿大勘探有限



1—球阀门;2—轴承和弹簧;3—电池和控制电器;4—TEC 和控制电路;5—内筒;6—球阀;7—球阀座;8—上部密封;9—密封短节;10—压力控制系统和蓄能器;11—磁性开关;12—磁性短节;13—内筒门

图8 日本 PTCS 保温保压取样器结构示意图

公司(JAPEX,施工单位)、美国地质调查局(USGS)、美国能源部(US DOE)、德国地学中心(GFZ)、印度石油部(MOPNG of India)、印度天然气和气体管理局、BP—Chevron—Burlington 联合风险投资集团,以及国际大陆钻探计划(ICDP)等。

3.3 Mallik 5L-38 井水合物试采工程的钻探、取心、测井与样品分析测试^[8]

2002年加拿大 Mallik 水合物试采工程共布设了三口井,其井身结构及布置如图9所示。其中左、右两侧分别为3L-38和4L-38观测井,主要用于进行综合科学计划、井间层析X光射线成像测井研究、分布式温度测量(DTS)、监视生产试验;中间为5L-38生产试验井,主要用于实施综合科学计划、取心、测井和天然气水合物生产试验。水合物储层

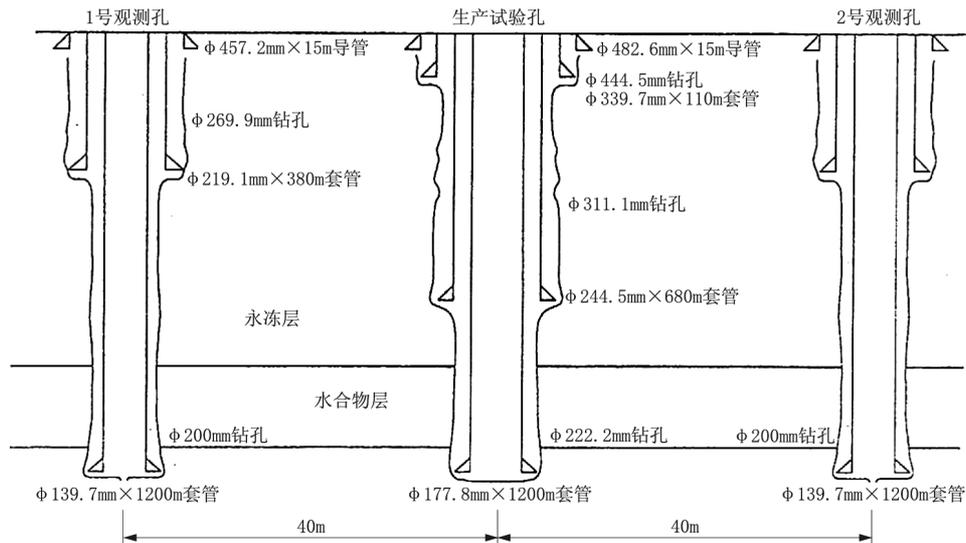


图9 2002年加拿大 Mallik 水合物试采工程钻孔布置及井身结构

由以砂岩为主的序列夹杂少量粉砂岩的互层组成。水合物的浓度为50%~90%。

从2001年12月25日—2002年3月14日,按3L、4L、5L-38井顺序钻进完毕。观测井3L-38井未钻及水合物层,井深1147m;4L-38井穿过水合物,井深1162.7m。两口观测井中间的5L-38井为生产试验井,井深为1113.7m。

此项目所用钻机为AKITA/Eqtak钻井公司的15型钻机。配备了防冻保护措施,钻深能力2000m,配置双立根伸缩钻塔(图10)^[9]。在此次项目施工的79天内,平均气温为 $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$,2月初最低气温达 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。



图10 Mallik 5L-38 生产试验井现场

Mallik 5L-38 井从水合物顶层 885 m 处开始取心钻进,在水合物层段实施连续取心,在 7 d 时间中钻至 1151 m,共取心 48 回次。全井段岩心采取率为 73.5%,水合物层段岩心采取率 >90%。采用了 Corion 公司的快速绳索取心系统,运用 6¼ in 取心钻头。

从钻孔中取出的水合物样品保存在液氮或压力容器,运送到依努维克研究中心进行样品分析测试。进行了孔隙度、渗透性、热传导性、磁化系数、自然 γ 射线和声波等物理性质测量,以及化学、微生物等方面的分析研究。见图 11。



图 11 Mallik 5L-38 生产试验井采取的岩心及整理处置

图 12 展示了从 Mallik 5L-38 井取得的含水合物砂岩岩心的薄片^[10]。由右图可见甲烷的来源与孔隙水流动密切相关,以及甲烷的聚集与水合物的生成。

在试采前、后对钻孔进行裸眼有线测井,生产井在钻进过程中进行随钻测井(LWD)。随钻测井可以测取到水合物的饱和度、电阻率、密度、伽马射线等 8 项参数指标。

3.4 Mallik 5L-38 井运用热注入法对水合物成功试采并进行局部降压试验

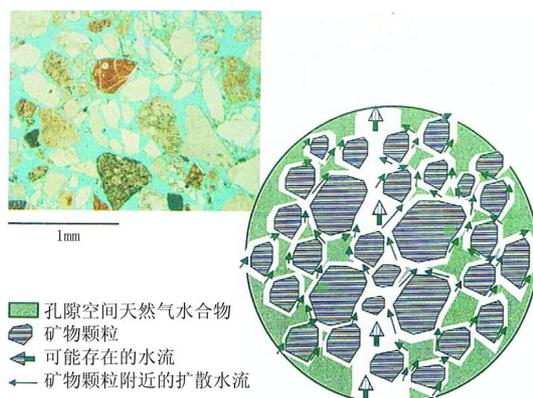


图 12 Mallik 5L-38 井含天然气水合物砂岩的薄片

3.4.1 天然气水合物开采的理论基础

根据天然气水合物相平衡图(图 13),当天然气水合物温度较低、压力较大时处于稳定的冰晶状态(蓝色区域);而当温度升高(红线方向),或是压力降低(绿线方向)时,天然气水合物就会分解,转变为甲烷天然气和水。

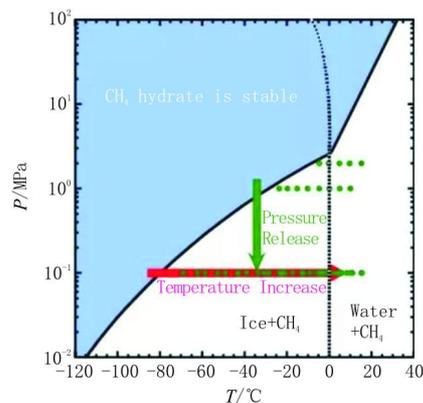


图 13 天然气水合物相平衡图

据此,天然气水合物开采有两种基本的方法——热注入法和降压法,如图 14 所示。此外,还有抑制剂注入法和二氧化碳-甲烷置换法等。

3.4.2 运用 MDT 进行局部降压测试^[8]

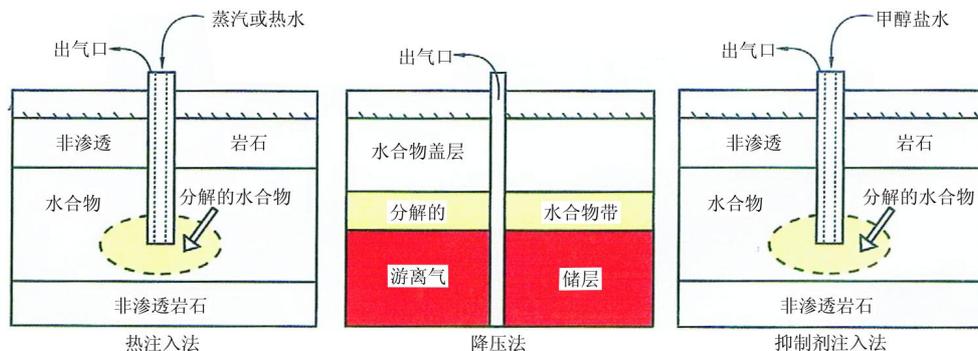


图 14 三种天然气水合物生产方法示意图(Collett,2002)

在 Mallik 5L-38 井运用组合式地层动态测试仪(MDT, Modular Formation Dynamic Tester)进行局部井段降压试验(图 15)。该仪器由 Schlumberger 公司研发并提供服务。MDT 总长 24.44 m, 质量 1180 kg, 最大直径 128.6 mm。内部安置了流体泵、压力传感器、双阻塞器、流体控制箱、流体取样器、光流体分析仪与伽马测量仪等。



图 15 组合式地层动态测试仪(MDT)

流体泵能够抽出或泵入地层中的流体,在较小的井段内降低或升高地层压力。压力传感器可以迅速感应井段内的压力变化,从而对地层压力作精确监测。

运用 MDT 在 5L-38 生产试验井中的 6 个富含水合物层段进行水合物降压小型测试。MDT 将试验井中每个测试层段 0.5 m 长度井段隔离封闭起来,对井壁周围的水合物储层用泵降压分解,再收集生成的甲烷气和水的样品,并测量压力、温度和流速变化。其数据由电缆传送至地面的德国地学中心(GFZ)的拖车实验室内处理分析。

Mallik 5L-38 井运用 MDT 所进行的局部井段地层的降压水合物分解试验,证明天然气水合物对压力降低非常敏感,运用降压法开采是可行的。

3.4.3 Mallik 5L-38 井运用热注入法天然气水合物试采成功

2002 年 3 月上旬,在 Mallik 5L-38 井内 13 m 厚(907~920 m)的含水合物的砂岩层段进行了热注入法开采试验,共 124 h(5 d)。热注入循环流体

为 KCl 聚合物冲洗液。在开采层段上部搭桥注水泥塞,并对此层段射孔。试采时,热流体经由 1 3/8 in 套管泵入试验井内(图 16),在井底加热射孔层段,再由 3 1/2 和 1 3/8 in 两层套管间的环空间隙返回地面^[8]。流体热量使层段内的水合物从原有的 7.7 °C 加热到 52 °C 左右,促使其溶化分解,生产出的甲烷气体与水随同循环液返回地表,再进行分离,完成试采流程。

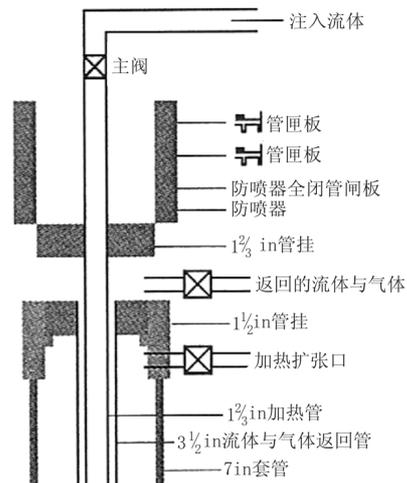


图 16 运用热注入法 Mallik 5L-38 试验井结构简图

2002 年 3 月 5~10 日,5L-38 生产试验井运用热注入法试采永冻带天然气水合物成功,5 天试采期间,产出甲烷天然气 470 m³,平均日产量 94 m³。所产气体在夜空燃烧,发出明亮的火焰(图 17)^[9]。



图 17 Mallik 5L-38 井上空燃烧着水合物试采出甲烷天然气的火焰

Mallik 5L-38 井水合物试采成功所运用的热注入法,由加拿大 APA 咨询公司(APA, Adams Person Associates, Inc)和日本 JAPEx 公司共同设计,由 Northland 能源公司实施完成。图 18 为 Mallik 5L-38 井热注入法试采测试示意图及测试结果^[10]。

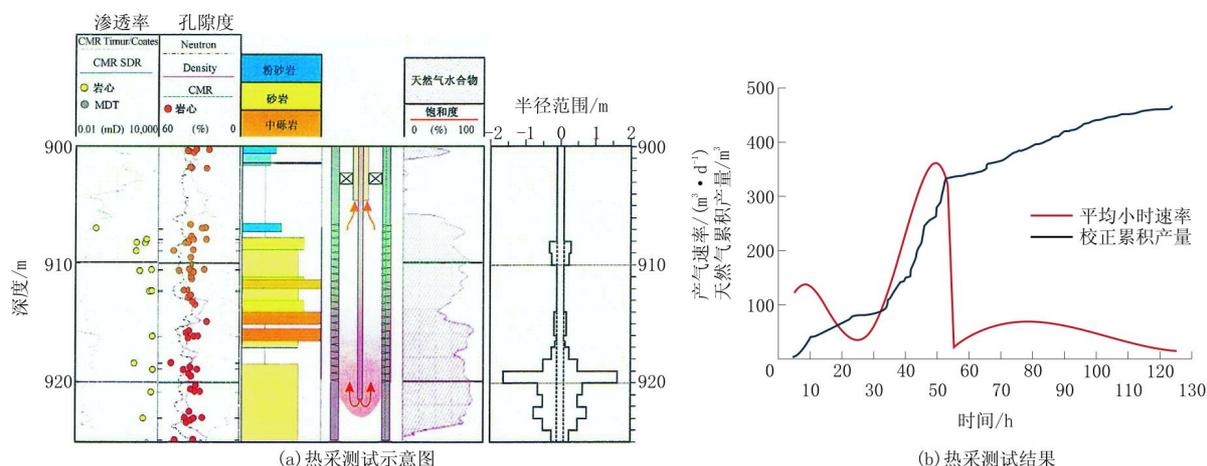


图 18 Mallik 5L-38 试验井在 907~920 m 层段热注入法试采测试示意图及测试结果 (Dallimore 和 Collett, 2005, 修改)

对生产试验取得的气体进行分析,结果表明,储层中产生的气体 97%~99% 为甲烷,其余为少量的乙烷和丙烷。

3.5 Mallik 5L-38 井水合物试采的总结与交流

为庆祝 2002 年 Mallik 5L-38 井水合物试采成功,交流钻探试采情况,总结科学成果,以及日本宣布其海域水合物开发三阶段计划任务,于 2003 年 12 月 8—10 日在日本千叶县(JNOC 所在地)召开了“从 Mallik 到未来”天然气水合物国际研讨会^[11]。到会机构有 GSC、JNOC、USGS、US DOE、GFZ、ICDP (此次会议协办单位)、GAIL/ONGC、BP - Chevron Texaco - Burlington 风投集团等。来自 13 个国家的科学家 250 人(含中国专家 7 人)参会,30 人论文宣读、45 人论文展示^[12]。

3.6 2002 年 Mallik 5L-38 井水合物成功试采的评价

(1) 2002 年加拿大 Mallik 5L-38 生产试验井通过 79 天的野外艰苦工作,在世界上首次试采水合物获得巨大的成功。这是水合物研发历史的里程碑,为许多国家呈现出开发利用这种新型、丰富、高效和洁净能源的新曙光。

(2) 这次水合物试采成功,既是继承借鉴了 4 年前 2L-38 试验井的钻探经验(如 KCl 泥浆体系、PTCS 保压取样钻具等),又运用了若干新技术,如随钻测井(LWD)、组合式地层动态测试仪(MDT)及岩样分析新技术等,保证了各项作业顺利有效进行^[13]。

虽然工程中出现一些故障,如试验井中钻头掉落井底,DTS 电缆在修理套管时破损,但这些不足以影响试采工程的圆满成功。

(3) 此次 5L-38 井采用热注入法试采水合物,证明这种方法是成功有效的。同时运用 MDT 在井内水合物层段进行了降压试验,在原理和实践上证实了降压法不仅实际可行,而且可能更为简单、经济。这为 2008 年在 Mallik 试采水合物提供了宝贵经验。

(4) 5L-38 井的水合物试采项目采取更为广泛的国际合作。除前述 5 国 10 家国际机构外,还有更多的权威学术机构(如美国国家实验室中的新能源技术实验室 NETL、劳伦斯—伯克利实验室 LBNL 等)参与。这种广泛的国际性专业合作,为这次水合物试采的成功奠定了重要基础。

4 2007—2008 年加拿大 Mallik 重返 2L-38 井运用降压法水合物试采成功

4.1 领导及参与机构^[14]

领导部门为加拿大自然资源部(NRCan)地球科学和能源政策司(Earth Sciences and Energy Policy sectors)。

资助机构为日本国家石油、天然气和金属公司(JOGMEC),及加拿大自然资源部(NRCan)。

野外施工单位为曙光(Aurora)学院/曙光研究所(位于依努维克)、加拿大西北疆域史密斯要塞(Fort Smith)。

根据上述参加单位名称,此次 2007—2008 年水合物试采项目也可称作“JOGMEC/NRCan/Aurora 水合物试采项目”。

4.2 Mallik 2L-38 井的延伸、扩孔及井下设备安置

2007 年 1 月,修建冰道,联接 Mallik 施工现场

与依努维克指挥和研究中心,以运送钻采设备及器材。2月,重返1998年钻采施工的2L-38试验井工地。将原孔深1150 m延伸至1310 m,并扩孔至 $\varnothing 311.5$ mm($12\frac{1}{4}$ in);在裸孔890~1100 m水合物层段进行5次测井,以进一步了解地层特性;将 $\varnothing 244.5$ mm($9\frac{5}{8}$ in)生产套管下至1288 m;将安置于套管外侧的5种地球物理传感器(JOGMEC研发)随套管下入,以作长期重复性系列测井。

在实施上述2L-38井作业同时,重返2002年的3L-38观测井,将该井由1188 mm延伸至1275 m;同上,裸孔测井与下套管测井;下 $\varnothing 73$ mm套管;完井;注水试验。

4.3 2007和2008年重返Mallik 2L-38井分别实施短时和长时持续试采

2007年与2008年在2L-38生产试验井(图19),分别进行天然气水合物的短时(12.5 h)和长时(6.8 d)的试采。运用降压法,即通过降低储层压力到低于水合物平衡的压力,使得水合物分解为甲烷天然气和水。图19中电动潜水泵(ESP, Electrical Submersible Pump, 兰色)即用于抽汲地层与井中的水以降低水位,达到水合物储层的降压分解。黄色为井下测量(温度、压力、流量等)仪表盒^[1]。

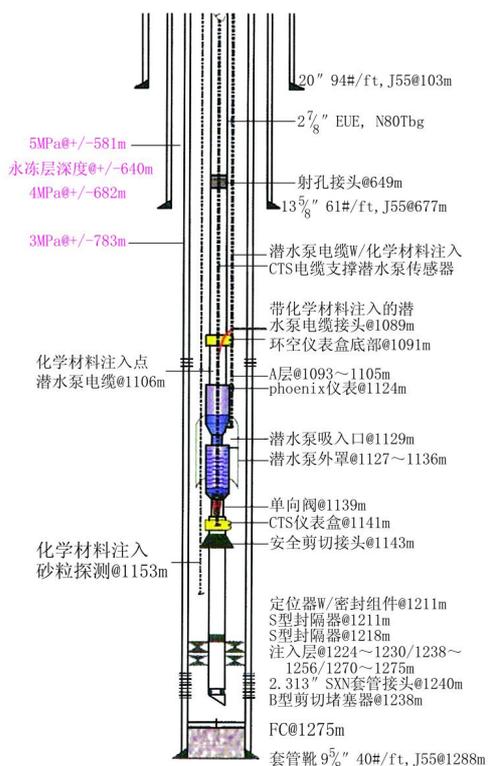
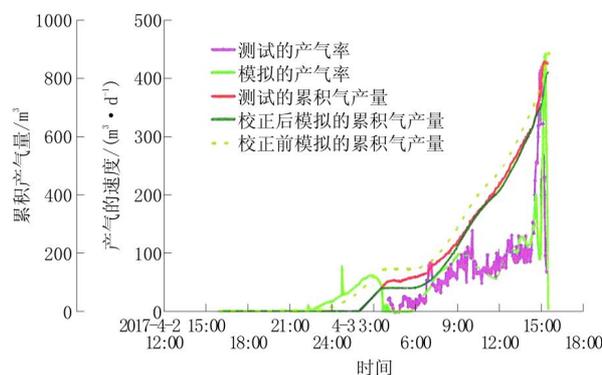


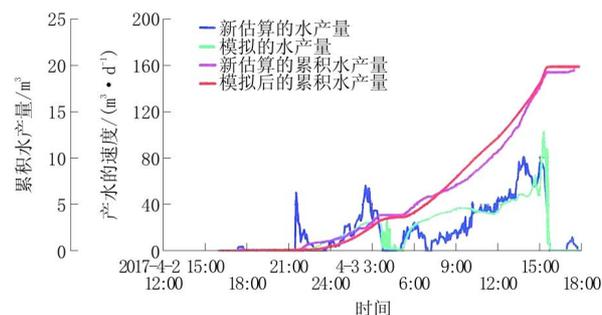
图19 2007年Mallik 2L-38试验井试采井身结构与井下设备安置

4.3.1 2007年2L-38井的短时水合物试采

2007年4月2—3日,在2L-38试验井内12 m(深度1093~1105 m)厚,具有较高水合物饱和度、高渗透率及压力、温度适于降压法试采的储层段,运用潜水泵平均降低压力3.7 MPa。在开泵抽水初始的十几小时内,气体和水的产出量极少,之后逐步增加。在试验阶段的最后12.5 h内,共获得830 m³的天然气体量,以及20 m³的水,见图20。为保护环境,产生的水被重新注入到水合物储层之下的含水层中去。



(a) 气体的产量



(b) 水的产量

图20 2007年Mallik 2L-38井短时试采水合物获取气量和水

4.3.2 2008年2L-38井的长时持续水合物试采

2008年3月10—16日,进行了长时间持续试采,试采系统如图21所示。根据测井取得的水合物储层岩性参数,确定井内射孔位置,再下放安置电潜水泵(ESP),与加热器(红色,用于提高温度,促进水合物分解)、压力温度(PT)传感器(黄色)等。

6.8 d试采中,保持2000~4000 m³/d稳定的产气量,共产天然气气量13000 m³。

4.4 2007—2008年加拿大Mallik 2L-38井水合物成功试采的评价

(1)2007—2008年加拿大Mallik重返2L-38试验井水合物成功试采,在6.8 d内获得持续稳定

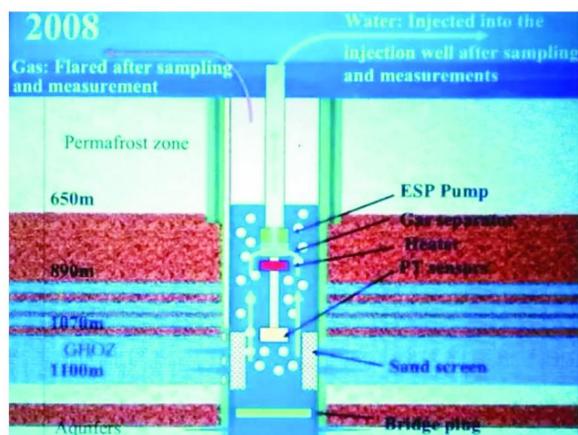


图 21 2008 年 2L-38 生产试验井降压法的试采系统

甲烷天然气量,这是国际天然气水合物研究开发史上的又一里程碑^[15],它向世界展示,商业性开发水合物已不再遥不可及。

2008 年 7 月在温哥华召开的第六届国际水合物大会上,日本和加拿大的专家介绍这两次水合物试采的成果,并透露一些关键技术。实际表明,当时日本已在水合物开发领域走在世界前列。此次会上,印度、韩国和中国也先后展示了各自在水合物勘查方面的成果。

(2)2007—2008 年 Mallik 水合物的成功试采,是加、日两国,特别是日本制订了详尽周密的中长期水合物勘查开发计划有关,并在实施中执行稳扎稳打、循序渐进的方针策略。1998 年因故未能试采,准备了 4 年于 2002 年,在运用热注入法试采的同时,运用组合式地层动态测试仪 MDT 对储层作降压试验,为下一步运用减压法试采提供数据;2007—2008 年的减压法试采,先作短时试采,第二年再作长时持续性试采。这两次试采为 5 年后 2013 年在更为困难艰险的海域水合物试采奠定了坚实的技术基础。

(3)加拿大 Mallik 2002 年与 2007—2008 年分别用热注入法和降压法试采水合物取得的成功,对于今后开发地球上量大面广、资源丰富的陆域永冻带水合物具有重要的意义。由图 22 可见,约 20% 的北半球陆地面积为永久冻土带^[10]。据对其温度

条件推测,在现今海水深度 120 m 海底以下 130 ~ 2000 m 范围的北冰洋大陆坡(浅兰色)中,广泛地存在着天然气水合物。北冰洋海底砂岩中的天然气水合物地质资源量约为 $187.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。加拿大 Mallik 成功试采永冻带水合物所运用的方法、技术、工艺以及设备、器具等对于今后本国和其它国家陆域永冻带水合物开采具有重要的借鉴、参考价值。

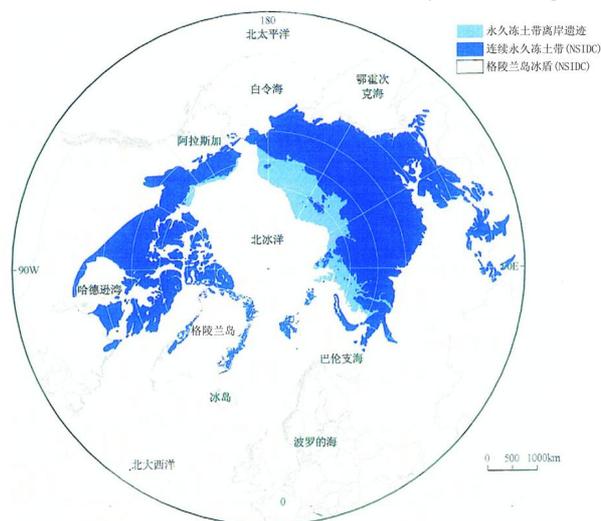


图 22 北半球永久冻土带的分布 (Collett, 2002, 修改)

(4)2007—2008 年试采证明了运用降压法比热注入法更加简单、经济^[16],且具有高得多的产气生产效率。仅 2007 年的短时 (12.5 h, 半日) 试采的 830 m^3 就为 2002 年热注法 5 d 试采 470 m^3 的 1.77 倍;2008 年长时持续试采的日产气量 1912 m^3 则为 2002 年 94 m^3 的 20.3 倍。这证明了运用降压法并辅以井底加热是有效、实用、高产的水合物开采方法。

(5)2007—2008 年 Mallik 试采中存在的主要问题是砂质沉积物堵塞潜水泵和管道,影响生产气体和水的流动。这需要进一步深入研究解决。

5 加拿大 Mallik 天然气水合物试采工程总结

从 1998 ~ 2008 年,加拿大和日本合作,多国参与,在 Mallik 永冻带成功实施了三次天然气水合物试采,取得的成果见表 2。

表 2 加拿大 Mallik 永冻带天然气水合物 3 次成功试采效果

序号	日期	试验开采时间	总产气量/ m^3	日均产气量/ m^3	开采方法	生产试验井名称	备注
1	2002.03	5 d	470	94	热注入法	5L-38	
2	2007.04	12.5 h	830		降压法	2L-38(重返)	短时试采
3	2008.03	6.8 d	13000	1912	降压法	2L-38(重返)	长时持续试采

由表2可见,虽然加拿大 Mallik 历经 10 年三次的天然气水合物试采,看起来似乎气体产量不高,产气持续时间不长,但是纵观几千年世界科技发展史,几乎任何工程技术上的发明和创新过程,都是从无到有、从难到易、从小到大、从少到多的。

加拿大 Mallik 2007—2008 年水合物试采的成功,到现在已经过去 10 年了,但其在陆域永冻层天然气水合物试采的技术工艺,与产气效果至今仍处于世界领先地位。

参考文献:

- [1] 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,2013.
- [2] Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas-hydrates—A potential energy source for the 21st Century [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2007,56(1-3):(14-31).
- [3] 邵明娟,张伟,吴西顺,等.麦索亚哈气田天然气水合物的研发[J].国土资源情报,2016,(12):17-19,31.
- [4] T.小原,S.R.德里莫,E.乔弗.日本石油公团石油资源开发公司及加拿大地质调查局;Mallik 2L-38号天然气水合物研究探井的钻探施工[C]//天然气水合物勘探与开发技术译文集(1).中国地质调查局,中国地质科学院勘探技术研究所,2001.
- [5] 王达,何远信,等.地质钻探手册[M].湖南长沙:中南大学出版社,2014.
- [6] T.J.胜部,S.R.多里莫,T.内田,等.加拿大北部天然气水合物研究[C]//天然气水合物勘探与开发技术译文集(1),中国地质调查局,中国地质科学院勘探技术研究所,2001.
- [7] Kirk Osadetz. Natural Gas Hydrates in Canada: An Economically Attractive Energy Alternative [EB/OL]. Fire in the Ice/Methane Hydrates Newsletter, Vol. 3, Iss. 2. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas/methane-hydrate/fire-in-the-ice>.
- [8] 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.
- [9] www.Mallik.icdp-online.org/
- [10] [美] T.科利特,A.约翰逊,C.纳普,等.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.
- [11] Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON METHANE HYDRATES, “FROM MALLIK TO THE FUTURE” [EB/OL]. Announcements, Fire in the Ice/Methane Hydrates Newsletter, Vol. 3, Iss. 2. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas/methane-hydrate/fire-in-the-ice>.
- [12] Thomas H. Mroz. MALLIK RESULTS PRESENTED IN CHIBA, JAPAN [EB/OL]. Fire in the Ice/Methane Hydrates Newsletter, Vol. 4, Iss. 1. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas/methane-hydrate/fire-in-the-ice>.
- [13] Ray Boswell, Deborah Hutchinson, Pulak Ray. CHANGING PERSPECTIVES ON THE RESOURCE POTENTIAL OF METHANE HYDRATES [EB/OL]. Fire in the Ice/Methane Hydrates Newsletter, Vol. 5, Iss. 3. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas/methane-hydrate/fire-in-the-ice>.
- [14] Dallimore, Natural Resources Canada and 2006-08 Mallik team. Community update on the 2006-2008 Joggmec/NRCan/Aurora Mallik Gas hydrate production research program, northwest territories, Canada [EB/OL]. Fire in the Ice/Methane Hydrates Newsletter, Vol. 7, Iss. 2. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas/methane-hydrate/fire-in-the-ice>.
- [15] Koji Yamamoto, Scott Dallimore. Aurora - Joggmec - NRCan Mallik 2006-2008 Gas Hydrate Research Project Progress [EB/OL]. Fire in the Ice/Methane Hydrates Newsletter, Vol. 8, Iss. 3. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas/methane-hydrate/fire-in-the-ice>.
- [16] Yoshihiro Masuda, Koji Yamamoto, Shimada Tadaaki, Takao Ebinuma, Sadao Nagakubo. Japan's Methane Hydrate R&D Program Progresses to Phase 2 [EB/OL]. Fire in the Ice/Methane Hydrates Newsletter, Vol. 9, Iss. 4. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas/methane-hydrate/fire-in-the-ice>.
- [17] AAPG HEDBERG RESEARCH CONFERENCE ON GAS HYDRATES [EB/OL]. Announcements, Fire in the Ice/Methane Hydrates Newsletter, Vol. 4, Iss. 4. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas/methane-hydrate/fire-in-the-ice>.
- [18] USGS Leads United States Effort in Mallik Well [EB/OL]. Announcement, Fire in the Ice/Methane Hydrates Newsletter, Vol. 2, Iss. 1. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas/methane-hydrate/fire-in-the-ice>.
- [19] Tim Collett. worldwide Search for Affordable Gas [EB/OL]. Fire in the Ice/Methane Hydrates Newsletter, Vol. 3, Iss. 2. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas/methane-hydrate/fire-in-the-ice>.