

编号: 0258-7106(2011)04-0711-14

大陆天然气水合物的资源开发与环境研究刍议*

刘玉山, 吴必豪

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要 天然气水合物分为大陆型和海洋型两大类。大陆型天然气水合物矿床常赋存于永久冻土带,如西伯利亚、加拿大北部、阿拉斯加。近年来,中国在青海木里的冻土带也发现了天然气水合物,它们赋存在1 000 m深的砂岩和泥岩层中。大陆天然气水合物的资源量是相当巨大的,估计约为 $(1\sim 7.4)\times 10^{14}\text{m}^3$ 甲烷。现在科学家已经研究出从冻土带水合物中开采甲烷的技术和方法,主要有降压开采法、热激开采法和试剂注入开采法3种,其中,降压开采法被认为是较经济有效的。

关键词 地质学;天然气水合物;大陆水合物;水合物的开采

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

Continental natural gas hydrate, its resource and perspective for exploration

LIU YuShan and WU BiHao

(Institute of Mineral resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract

There are two kinds of natural gas hydrates in the earth: oceanic and continental. The continental hydrate deposits usually occur in permafrost regions such as Siberia, northern Canada and Alaska. Recently China has found gas hydrates in Muli permafrost region of Tibetan plateau. They are existent in sandstone and siltstone beds less than 1 000 m in depth. The continental hydrate reservoir is quite huge in size and the reserve is estimated to be about $(1\sim 7.4)\times 10^{14}\text{m}^3$ methane. Nowadays scientists have studied the suitable technologies to extract methane from hydrate in permafrost region. There are mainly three methods for exploration, i. e., depressurization, thermal stimulation and inhibitor injection. The depressurization method is considered to be more economical and effective than other means.

Key words: geology, natural gas hydrates, continental hydrate, exploitation of hydrate

天然气水合物(也简称水合物)是一种具有巨大潜力的新能源矿产,它以其储量巨大及较传统能源更清洁而倍受瞩目。依据最新的较为保守的估算,全球海洋和陆地上已发现的天然气水合物矿藏所蕴藏的甲烷气体约为 $(1\sim 5)\times 10^{15}\text{m}^3$ (1 000~5 000 万亿 m^3),比全世界天然气的已知总储量还多。此外,单位能量的甲烷燃烧所释放出来的温室气体

CO_2 仅为煤炭的1/2。因此,水合物被认为是未来最有远景的新能源。

当前工业社会对新能源的需要促进并加速了工业国家对天然气水合物矿藏的勘察和开发研究。进入新世纪以来,美国、加拿大、日本、中国、俄罗斯及印度等国都加大了对水合物资源勘查和研究的力度,并开始了对水合物开发工艺的研究和开采试验。

* 第一作者简介:刘玉山,男,1935年生,研究员,长期从事实验矿物岩石学研究,近十年来转向大洋富钴结壳及天然气水合物矿产方面的研究。Email: Yushan613@gmail.com

收稿日期: 2010-08-26; 改回日期: 2011-02-24。许德焕编辑。

早在上世纪 60~70 年代,前苏联就在西伯利亚冻土区进行过陆上水合物的开采。加拿大与日本合作,于 2002 年及 2008 年两度对加拿大马更些三角洲的 Mallik 水合物矿藏进行了开采试验。最近,美国地质调查局(USGS)宣称,已在墨西哥湾勘测到了适宜于开采的海底天然气水合物富矿(Mims, 2009),拟尽早进行试验开采。日本计划于 2017 年开始开采南海海槽(Nakai Trough)的海底天然气水合物。可以说,当前世界上不少发达和发展中国家正在大力开展天然气水合物矿产的勘察,并已进入开发利用的研究阶段。

中国继 2007 年在南海北部陆坡钻探出海底天然气水合物之后,又于 2008 年冬在青藏高原(青海省天峻县的木里地区)发现了水合物。这使中国成为第 4 个在陆地上发现天然气水合物的国家。更值得指出的是,此前曾认为大陆上的水合物只产于两极地区的永久冻土带(俄、加等国的大陆水合物即属于此),中国的发现则突破了这一认识,首次在中纬度地区的高山冻土带内找到了水合物储层,为陆上水合物资源的勘查开发与环境研究开启了新的篇章。

1 大陆天然气水合物的分布与资源量

依据天然气水合物的物理化学理论,作为笼状包合物的天然气水合物可以生成和稳定存在于低温及较高压力的环境中。据此认为,在自然界,凡是有丰富的水和烃类气体,且温度较低、压力较高(较深)的地方(图 1),都可能存在天然气水合物,即天然气水合物的形成和堆积需要同时具备上述 4 个条件。世界大洋的陆坡海底、极地地区以及大陆中高纬度地区的永久冻土带,都可能是水合物的赋存地。

迄今,在世界三大洋的海底,已发现了天然气水合物的矿藏或矿点百余处,在南、北两极地区和内陆湖、海的水底也见有 20 多处。虽然大多数水合物矿藏及矿点属海洋型的,但陆上的水合物也占有重要的地位,其重要性也日趋明显。回顾历史,水合物在自然界的最先发现恰恰是在大陆上。1961 年 7 月 21 日,在西伯利亚麦索亚哈油气田的地下,第一次发现了冰雪状的天然气水合物(1969 年 12 月 24 日获正式注册),被认为是一件划时代的事件。因为在此之前的一百多年内,气体水合物一直被视为是实验室里一种珍奇的化合物,或者只是一种堵塞天然气

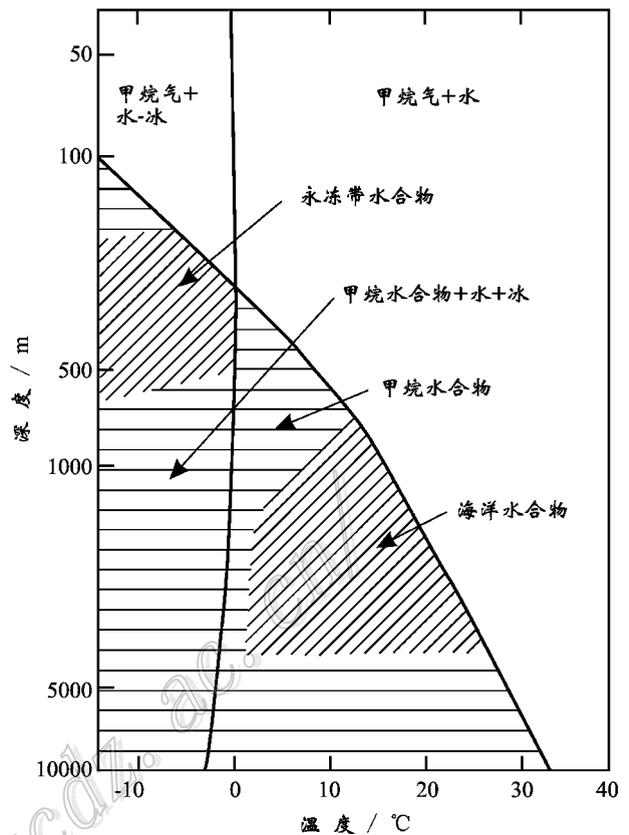


图 1 大陆和海洋天然气水合物形成和稳定的温度与深度条件(据 Max et al., 2006)

Fig. 1 Temperature-depth conditions for the formation of continental and oceanic gas hydrates (after Max et al., 2006)

运输管道的有害物质。从此后,水合物在自然界是否广泛存在,以及它能否作为未来的能源等问题,开始引起人们的关注。又经过十多年的努力,地质学家才在马更些三角洲和中美海槽发现了大规模的大陆型和海洋型水合物矿藏,实现了认识上的飞跃。

陆域水合物的优势还在于它较海底水合物的开发风险小,成本较低。它不会像海底开采那样,由于水合物的泄露、突然分解或采空而导致海底坍塌、滑坡或海啸。已有的开采经验表明,陆域密封钻井式的开采技术是可行的,其开采成本也较海上的低。事实上,过去已进行的和现正在进行的水合物的试验开采,大都在陆上。预计在不远的将来,人类最先进行水合物工业开发可能就在大陆上。

从现有资料分析,大陆上的天然气水合物通常形成和分布于 3 种不同的地质环境:极地或高纬度地区的永久冻土带,主要是北半球的西伯利亚、阿拉

表 1 大陆及极地天然气水合物产地发现的相关资料

Table 1 Data of the occurrences of hydrates in continental and arctic regions

产地代号	地理位置	深度/m	判定依据	资料来源
大陆				
C1	美国 阿拉斯加		测井 取样	Collett, 1993
C2	加拿大 马更些三角洲 69°27.6' N, 134°39.6' W		测井 取样	Sloan et al., 2007; Dallimore et al., 1999
C3	北极岛		测井	Sloan et al., 2007
C4	西伯利亚 麦索亚哈		CH ₄ 开采	Sloan et al., 2007
C5	俄罗斯 吉曼		解析	Sloan et al., 2007
C6-8	西伯利亚		解析	Sloan et al., 2007
C9	青藏高原 木里		取样	祝有海等, 2009
大陆湖、海				
O1	黑海 45° N, 35° E	水深 2 052 海底下 0.7~2.2	取样 BSR	Sloan et al., 2007
O2	里海 39° N, 50.25° E	水深 475~600 海底下 0~1.2	取样 BSR	Sloan et al., 2007
O3	贝加尔湖 51°44' N, 105° 29'E	水深 1 433 海底下 121~161	BSR 取样	Sloan et al., 2007
O4	地中海(ODP160)		Cl, CH ₄	Sloan et al., 2007
O5	土耳其(Kula 泥火山) 35°40' N, 30° 28'E	水深 1 700 湖底	取样	Sloan et al., 2007
北极				
N1	阿拉斯加		BSR	Sloan et al., 2007
N2	加拿大 波弗特海		测井	Sloan et al., 2007
N3	加拿大 Sverdrup 盆地		测井	Sloan et al., 2007
南极				
S1	威尔克斯(Wilkes)陆缘		BSR	Sloan et al., 2007
S2	罗斯海(Roos Sea)		CH ₄	McIver, 1975
S3	威德尔海(Weddell Sea)		BSR	Sloan et al., 2007
S4	南设得兰(South Shetland)陆缘		BSR	Sloan et al., 2007

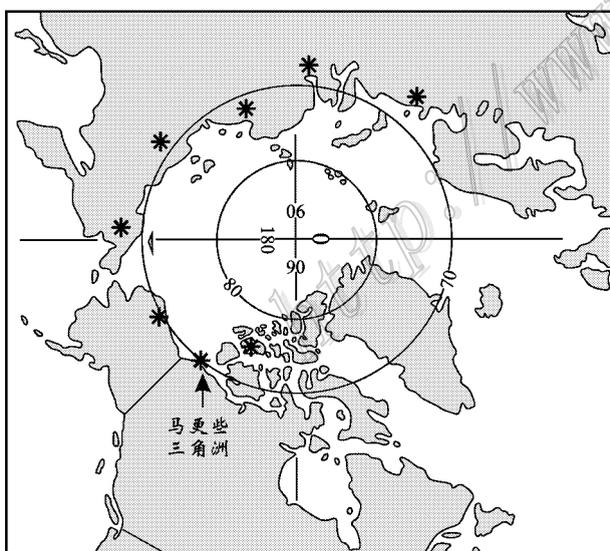


图 2 大陆天然气水合物在北半球的分布

Fig. 2 Distribution of continental gas hydrates in the north hemisphere

斯加、加拿大北缘的波弗特海(Beaufort sea)和马更些三角洲等地, 内陆湖海水底, 如贝加尔湖、黑海、里海、地中海等; 中、低纬度地区高山冻土带。

大陆上已发现的天然气水合物矿藏和矿点有 20 余处, 它们有着不同的规模和研究程度。现将全球水合物产出地的统一代号、地理位置、地质环境、以及水合物判定的依据等分别列于表 1 和示于图 2。

发育于极地地区永久冻土带的天然气水合物通常位于冻土层之下 100~1 000 m 的地层中。含水合物的岩层多为砂岩、细砂岩、砂质泥岩等。水合物层的厚度多为十几米至 100 m。矿石矿物呈浸染状、块状、星散状、脉状等构造。水合物为 I 型结构, 其气体成分主要是甲烷, 常占气体体积分数的 98% 以上。大陆水合物中的甲烷通常为生物成因, 但深部的水合物有时含有一定量的乙烷、丙烷, 被认为是生物和热解气混合成因。

目前, 有关大陆天然气水合物矿藏的规模和资源量的资料还不是很多, 这与过去的研究和勘查程度较薄弱有关。尽管如此, 从已有资料来看, 其资源量还是非常巨大的。美国地质调查局 2004 年的报告显示, 仅阿拉斯加的水合物矿藏, 以甲烷为主的天然气资源量估计为 $16.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (16.7 万亿 m^3), 相当于全美国 30 年的用气量。而尚未探明的西伯利亚和加拿大极地地区水合物矿藏的规模和资源量

表2 大陆天然气水合物矿藏资源量的评估

Table 2 Established resource size of continental hydrates

产地代号	地理位置	资源量(CH_4) $\times 10^{12}$ m^3	评估方法
C1	阿拉斯加北坡	2.42×10^{12}	计算
C1	全阿拉斯加	16.7×10^{12}	估算
C2	马更些 波弗特	$(2.4 \sim 87) \times 10^{12}$	估算
C3	北极岛	$(19 \sim 620) \times 10^{12}$	估算
C4	麦索亚哈	0.062×10^{12}	计算
O1	黑海	$(40 \sim 50) \times 10^{12}$	估算
	黑海	$(42 \sim 49) \times 10^{12}$	估算
C9	中国 木里	25×10^{12}	估算
	大陆永久冻土带	340×10^{14}	估算
		0.31×10^{14}	估算
		1×10^{14}	估算
		7.4×10^{14}	估算

注:据 USGS(<http://www.wikipedia.com>)2004 资料修编。

更大。表2列出了若干已知的陆区和内陆湖海海底水合物矿藏的资源量,以及一些学者对全球大陆水合物资源总量的评估值。由表2可见,大陆水合物矿藏的资源量相当可观,如果去掉早期的最高和最低评估值,其总量将为 $(1 \sim 7.4) \times 10^{14} \text{ m}^3$,即100~740 万亿 m^3 约占全球水合物资源总量的14%。

2 大陆天然气水合物的开采技术和方法

近30年来,各国科学家对水合物的开发技术已经进行了比较系统的实验室研究和小规模在现场开采试验,初步掌握了开采方法的基本原理。研究和试验表明,水合物开采的基本原则是,必须首先把水合物分解,转变成气体后再抽取上来,通过管道运送到气体储集站。整个过程必须符合环保要求,不能让甲烷气体外泄。

2.1 天然气水合物矿藏开采的原理和方法

根据水合物的热力学相平衡理论,有3种途径可以使地下的水合物分解,即减压、加热或注入抗凝剂的化学试剂(图3)。据此基本原理建立了陆上水合物开采的3种基本方法,即降压开采法(depressurization)、热激开采法(thermal stimulation)和试剂注入开采法(inhibitor injection)。这3种水合物开采方法的技术构架示意于图4。还应当补充的是,上述仅为常用的开采方法,现代工艺技术的进步还产生了一些新的技术方法,如火烘法(fire flooding)、填埋核废料法(burial of nuclear wastes)、电磁加热法、 CO_2 置换法等。

永久冻土带内天然气水合物储层的赋存状态

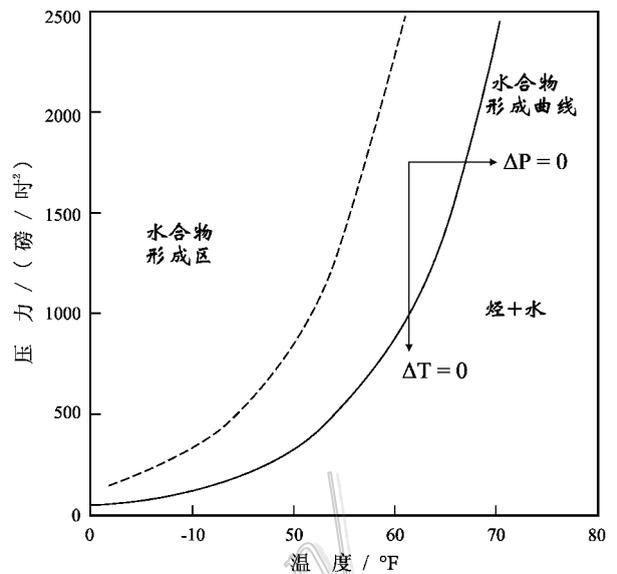


图3 显示天然气水合物分解的压力-温度相平衡图

(据 Sloan et al. 2007)

$\Delta T=0$ 为等温减压法; $\Delta P=0$ 为等压加热法;虚线为化学剂注入法

Fig. 3 Phase diagram showing the means for dissociation of gas hydrates (after Sloan et al. 2007)

和储层的地质构造可划分为3个类型:

- 类型1 在天然气水合物层之下存在气体+水的两相带;
- 类型2 在天然气水合物层之下只存在水相带(含水层);
- 类型3 天然气水合物层之下缺失流体层,即为单一水合物层。

在类型1中,水合物稳定带的基底通常与水合物储层的基底一致。从开采意义上讲,这是一种最理想的储层,因为在这种情况下,水合物储层的热力学状态很接近于水合物的形成-分解平衡曲线,仅需少许温-压的改变即可引发水合物分解。在类型2及类型3中,储层中的水合物处于稳定带内,可能是平衡状态,也可能是稳定状态。这2种类型的水合物储层从开采角度看不算理想,因而,对它们的研究程度也不及类型1;对它们进行开采可能会有较复杂的问题,例如,它们的状态离平衡态较远则会难以开采,还有环境问题、开采的经济问题等。

降压开采法 通过钻孔和其他途径来降低水合物层之下流体层(游离气体和水)的平衡压力,或者通过矿层裂隙抽取其中的流体来直接降压,以破坏天然气水合物的压力平衡,使其发生分解,释放出甲烷气体。

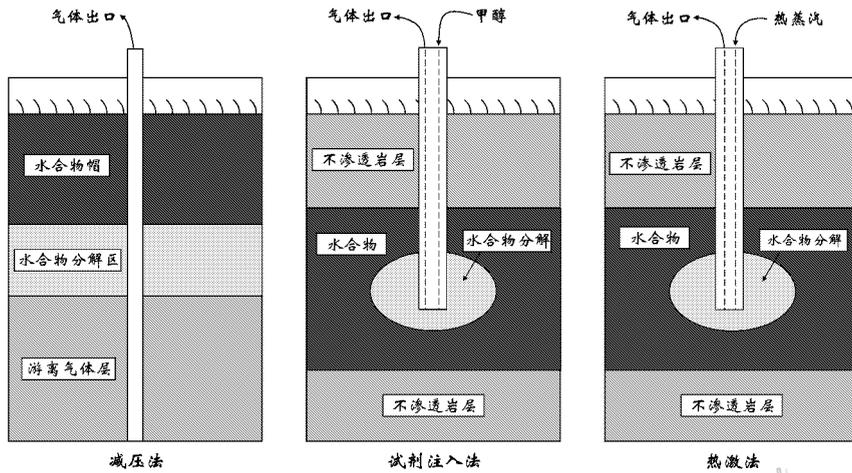


图 4 大陆天然气水合物开采方法的示意图(据 Makogon ,1997)

Fig. 4 Three methods for exploitation of continental hydrates(after Makogon ,1997)

通过钻井进行降压开采是最常用的技术。依据水合物储层的构造,钻井开采有 2 种模型。

(1) 对下伏气 + 水两相带进行抽气开采。此时的钻孔应穿过水合物层并抵达游离气体带(图 5)。

当钻井到达气体层,气体从井口喷出,储层的压力就会下降,导致水合物开始分解,其分解的速度取决于压力下降的速度和储层的热传导性。热传导之所以重要,是因为水合物分解所需的热能要来自水合物储层本身。但一个生产井的天然气产量和产气速度,除与降压速度有关外,还与水合物储层的规模、含气层的薄厚等诸多因素有关。产气井在开采

了一段时间之后,其产气速度会逐渐降低直至枯竭。

(2) 通过抽取裂隙流体直接降压的开采模型。利用钻孔沿水合物储层中的裂隙抽取矿层内的水,来降低矿藏的压力,从而使水合物发生分解,产生甲烷等烃类气体供开采(图 6)。水合物的分解是一个吸热过程,在这一过程中,矿层的温度会降低,从而在矿藏中形成温度梯度,而温度梯度又可以促使水合物矿藏内外发生热对流,来自相邻地段的热能可以帮助矿藏恢复至原来的温度。

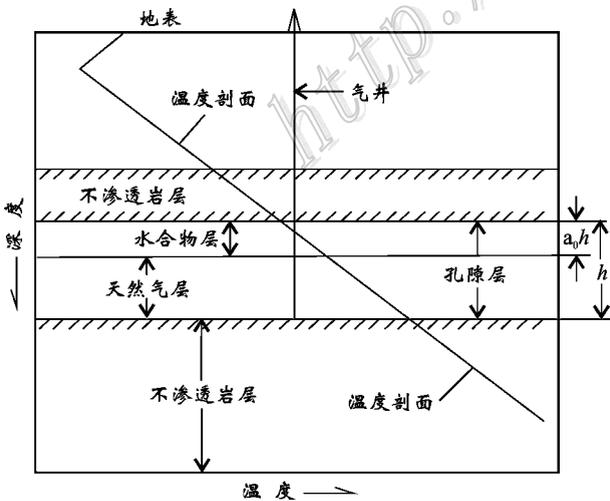


图 5 通过钻井使水合物储层降压的产气模型 (据蒋国盛等 2002)

Fig. 5 Depressurization method ussing the drilling (after Jiang et al. ,2002)

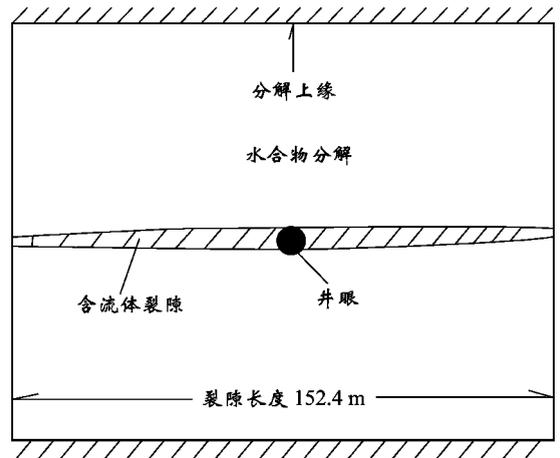


图 6 通过抽取裂隙水直接降压的开采模型 (据蒋国盛等 2002)

Fig. 6 Depressurization method throuth pumping the pore water from the well(after Jiang et al. ,2002)

热激开采法 又称热力开采法或热注入开采法 (thermal injection method)。顾名思义就是向水合物矿

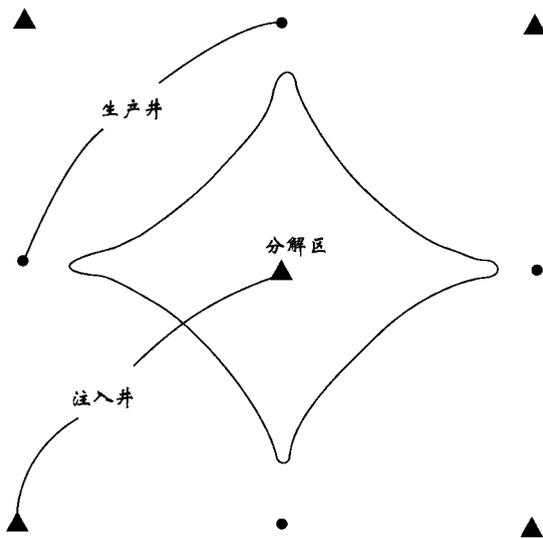


图7 热激法开采时多井注入水蒸气(据蒋国盛等,2002)

Fig. 7 Injection of hot water through a series of wells (after Jiang et al., 2002)

藏内部注入热水、热卤水或热蒸汽等,对矿藏的水合物储层进行加热,以提高待开采矿段的温度,促使天然气水合物发生分解,再用导管采集分解出来的甲烷气体并输送至贮藏器内。

该方法用于注入热量的载体多为高温水蒸气或热卤水。由于热传导不像压力降那么迅速、广泛,因此,热注入井往往不止一个,而是由多个注入井组成加热区块。在加热区块内应合理布置采气井(图7)。

对加拿大冻土带内的一个水合物储层曾进行过热激开采试验。该钻井钻到的水合物层厚约20 m。在试验过程中,钻孔进入水合物层13 m,并由此孔注入热卤水,之后,水合物层的温度上升到50℃,水合物便发生分解,释放出的甲烷气体由循环管道收集。试验者强调说,这只是一场试验,共持续了125 h,试验期间共生产气体468 m³,试验停止后又收集到气体48 m³。试验结果显示,热激开采试验所产生的气体量是试验持续时间的函数。

此外,在应用减压法进行开采时,为加速水合物的分解,也可通过沿裂隙的钻孔向水合物储层注入热水。注入热水后,矿藏的温度有所提升,可刺激和加速水合物的分解。这样,依据矿层具体的温度-压力情况,2~3年之后水合物矿藏就可以进行再开采。

试剂注入开采法 就是使用能降低水合物分解温度的抗凝结化学试剂来促使水合物分解。常用的化学试剂有甲醇、乙二醇、氯化钙等。一般是通过钻井注入低浓度的试剂,以改变水合物层的温-压平衡

状态,从而使原来的水合物变得不稳定,分解出天然气和水。试剂注入法也可以与减压法配合使用。

这种加入试剂分解水合物的原理,类似于天然气输送管道中形成水合物堵塞物后用抗凝结化学试剂予以解堵。

2.2 陆域天然气水合物矿藏的开采试验

在全球水合物资源的调查研究进程中,科技界首先对陆域水合物进行了开采试验。上世纪70年代前,苏联对西伯利亚冻土带麦索亚哈气田内的天然气水合物进行了断续长达10来年的开采试验。2002年和2008年,加拿大联合美、日等国对Mallik水合物矿藏进行了2次科学且严谨的开采试验。美国在阿拉斯加也进行了开采试验。据此可见,陆域水合物矿藏的究研已率先迈入试验开采阶段。

(1) 麦索亚哈(Messoyakh)矿田天然气水合物的开采

麦索亚哈水合物矿田是人类第一个开采水合物的范例,自1970年前苏联对其断续开采达17年之久。

该矿田位于西西伯利亚的北部,毗邻麦索亚哈河,在叶尼塞河入海口附近的北极圈地带(图8)。该矿田在西西伯利亚的克拉通盆地内,其本身是一个13 km×20 km的大背斜,覆盖面积达260 km²。水合物储层赋存在永久冻土带400~800 m深处,水合物层厚度为($n \times 10$) m到100 m。据统计,该矿田的

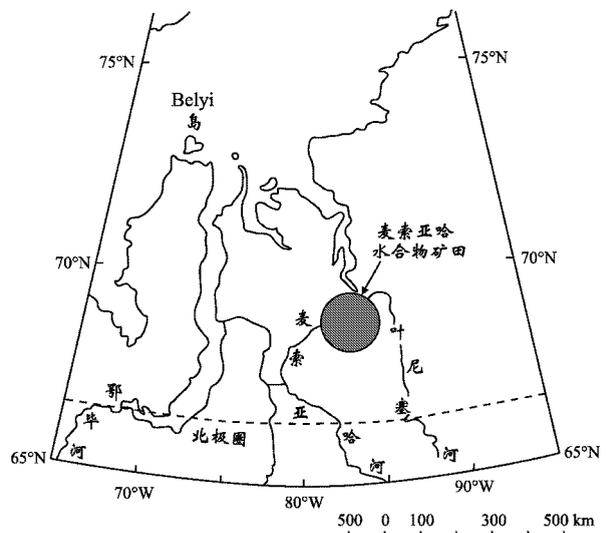


图8 麦索亚哈天然气水合物矿田的地理位置(据Krasov et al., 1985)

Fig. 8 Location of Messoyakh hydrate field (after Krasov et al., 1985)

天然气储量(包括游离气体和气体水合物 2 种形式)共计约 $62 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

麦索亚哈矿田蕴藏有天然气和天然气水合物,但以天然气水合物为主,来自水合物的气体占气体总储量的 $2/3$ 。水合物储层位于 74 m 厚的白垩系 Dolgan 建造内。该建造主要由砂岩及 30% 左右的页岩组成。砂岩的孔隙度约为 16%~38%,平均为 25%。岩层的渗透率为 $10 \sim 1\,000 \text{ mD}$ ($1 \text{ mD} = 0.987 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),平均为 125 mD。水合物储层的温度为 $8 \sim 12^\circ\text{C}$,压力为 7.8 MPa。

从矿田开采结构上讲,麦索亚哈水合物矿层属于类型 1,即水合物层之下有气体+水层(图 9),这种类型是最适于开采的。

该矿田曾使用减压法及减压+试剂注入法进行过开采。在矿田构造范围内约布置了 50 个生产井,

井距 $500 \sim 1\,000 \text{ m}$ 。1970~1977 年期间,天然气的平均日产量为 300 万 m^3 ,在其后 4 年的减产之后,产量稳定在 $20 \sim 50 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。由于开采后期遇到困难,曾制定了 2 种技术方法以提高天然气的产量:① 将钻井打到天然气水合物稳定带以下,以减压刺激水合物的分解;② 注入甲醇或 CaCl_2 。试剂注入开采的效果见表 3。试剂注入能短时间提高气体开采量。

甲醇对提高产量更有效些,而 CaCl_2 则更便宜些。生产实践还证明,注入混合试剂是一种经济可行的技术。但减压法则能维持水合物气体的长期开采。

麦索亚哈矿田断续开采达 17 年之久。随着开采的进展,矿层的压力和产气量也不断变化。图 10 显示出,109 孔中水合物储层的压力和采气量随开采

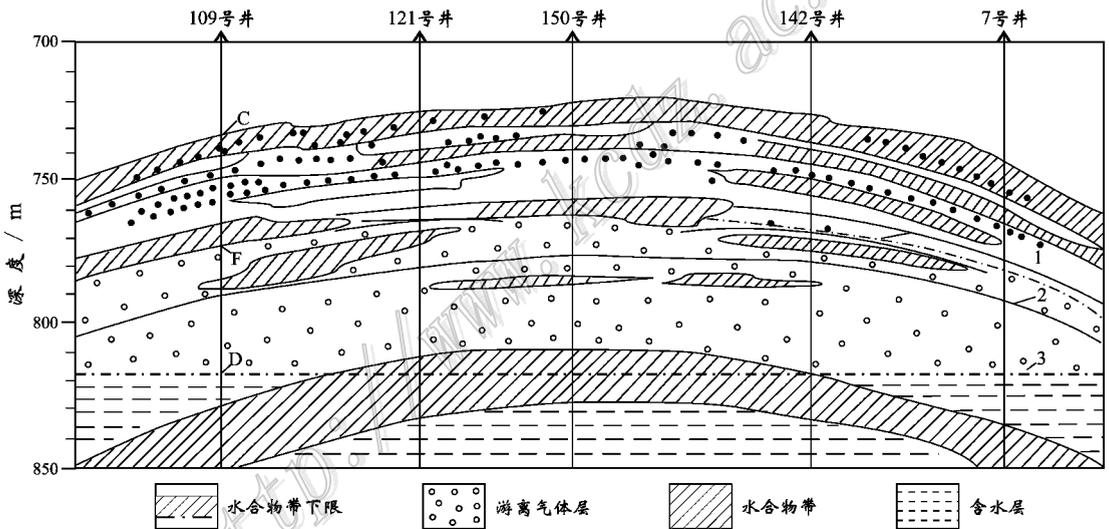


图 9 麦索亚哈水合物矿田的剖面图(据 Makogon, 1988)

Fig. 9 Cross section of Messoyakh hydrate field(after Makogon, 1988)

表 3 麦索亚哈矿田化学试剂注入开采的效果(据 Sloan 等 2007)

Table 3 Result of inhibitor injection for Messoyakh hydrate field(after Sloan et al., 2007)

钻井号	化学试剂	注入量($\text{m}^3/\text{天}$)	注入前流速($1\,000 \text{ m}^3/\text{天}$)	注入后流速($1\,000 \text{ m}^3/\text{天}$)
129	96% 甲醇	3.5	30	150
131	96% 甲醇	3	175	275
133	甲醇	—	25	50
138	90% MeOH + 30% CaCl_2	4.8	200	300
141	同 138	4.8	150	200
142	甲醇	—	5	50
		—	10	100
		—	25	150
		—	50	200

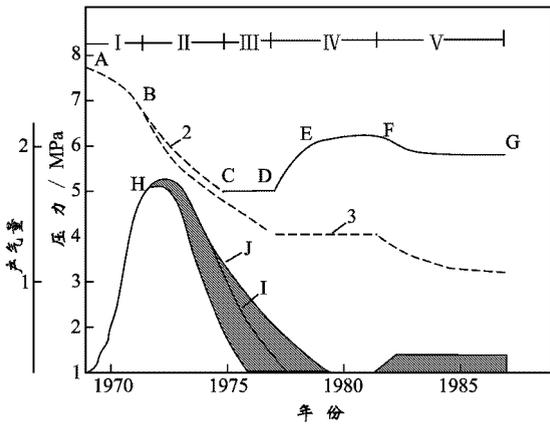


图 10 109 孔水合物储层内压力和产气量随开采时间的演变(据 Makogon ,1988)

上部实线为含水合物层的压力;A、B 为平衡压力;D~F 为产气时的温度和压力;下部实线为产气量;H 为开始产气

Fig. 10 Variation of reservoir inner pressure and gas production with exploitation time for well 109 (after Makogon ,1988)

时间而演变的情况。开采约 10 年后,至 1980 年,水合物储层的压力接近平衡压力,产气已很少,钻井关闭。闭井后的几年内仍有少量气体产出。

麦索亚哈矿田开采出来的天然气,98.6% 是甲烷,CO₂ 占 0.5%,已烷、丙烷大约各占 0.1%,重烃类含量极少,说明它是生物成因的。而碳同位素资料表明,部分烃可能来源于热解。

(2) 加拿大 Mallik 2002 天然气水合物矿的试验开采

麦索亚哈水合物矿田虽然已经过十几年的生产,但有一些人认为那只是一种工程开采(而不是科学开采),对当时的开采过程缺少科学的监测和记录。此外,部分采出的甲烷气体可能来自天然气(而非水合物)。因此,美、加科学家于 2002 年开始,对马更些三角洲 Mallik 水合物矿田进行试验开采。应该说这是一次比较正规的科学开采实验。这里集中了加、美、日、印等国的 265 位科学家和工程师,配备了大量的地球物理和测井仪器,采用了热激和减压 2 种方法进行开采试验,对矿层的多种物理化学参数也进行了实时记录。

Mallik 水合物矿田位于加拿大西北部的马更些三角洲(图 11)。在地质构造上,马更些三角洲属于北美大陆陆缘,是晚白垩世海底扩张形成的加拿大

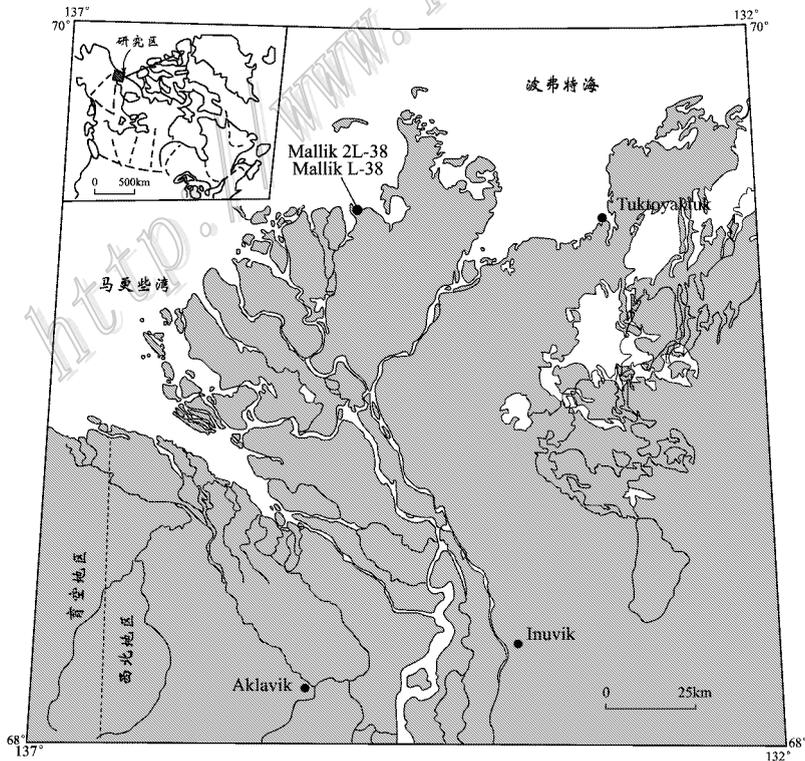


图 11 马更些三角洲 Mallik 水合物矿田和 Mallik L-38, Mallik 2L-38 钻井的地理位置

Fig. 11 Location of Mallik hydrate field and Mallik 38 well in Mackenzie Delta

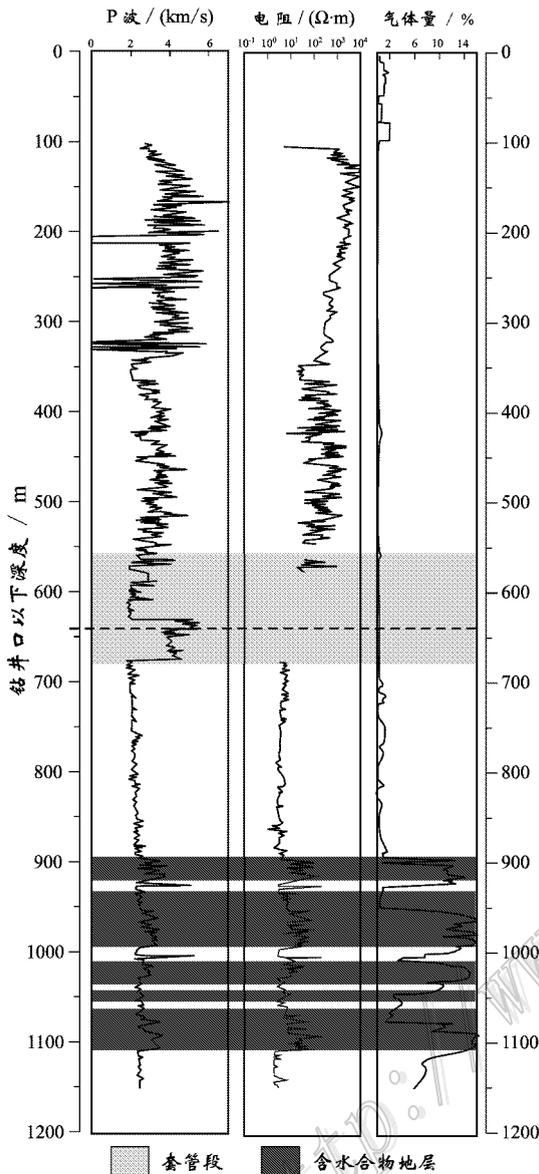


图 12 Mallik 2L-38 钻孔揭示的含天然气水合物层的岩芯柱状图(据 Dallimore et al., 1999)

Fig. 12 Mallik 2L-38 well logs showing the gas hydrate bearing sediments from 942 to 1107 m (after Dallimore et al., 1999)

盆地和波弗特海的大陆陆缘。波弗特海陆坡及马更些三角洲的沉积层主要为快速沉积的陆源碎屑砂岩,含丰富的有机质。

该矿田已完成了 L-38、2L-38 和 5L-38 三个钻孔,钻孔揭示的是全新世-渐新世的富含有机质的砂泥岩地层。在埋深 819~1100 m 井段,发育有大小不等的 10 个水合物矿层(图 12)。岩石的孔隙度为 35%,而且 80% 以上的空隙被水合物所充填。在经

钻孔探明的 10 000 m² 的面积内,储有水合物甲烷气体约 53.9×10⁶ m³。

为了进行开采试验,又打了 3L-38 和 4L-38 两个观察孔,与 5L-38 主孔沿直线分布。对 942~993 m 和 1070~1107 m 的水合物层进行了几次减压开采试验,在 892~930 m 的水合物层完成了热激法开采试验。MDT-2 是几次压力刺激试验中的一次(5L-38 孔的 1090 m 处水合物层)。试验的进程和结果是:① 试验开始 30 min 抽气 8 min 用以减压,其后 25 min 由于水合物分解,压力上升,释气;② 同理,在 1.2 h 时释气使减压 37 min,后 69 min 因水合物分解而使压力恢复;③ 试验达 3 h 时降压 16 min,接下来的 190 min 因水合物分解而使压力恢复,直至 6.25 h。7~8 h 之间,气体流向逆转,向钻孔内泵入流体以引起气体流速波动。9 h 时最后减压,释气 21 min 后封孔。图 13 显示了减压与水合物分解所释放出之气体流速的关系。由减压试验结果可以推算出减压所导致的水合物分解的速度和持续时间。

对 5L-38 孔的 907~920 m 处水合物层进行了热激法开采试验。向 13 m 厚的水合物层内泵入热卤水,再由外管流出使其循环(图 14)。如此将水合物储层的温度升高约 50℃。

在试验期间,气体的饱和度平均占孔隙的 70%,渗透率为 0.1 mD。开采试验结果显示,热激法开采试验产生的天然气数量是试验时间的函数(图 15)。在试验的 125 h 期间,共产生天然气 468 m³,封孔后又获得天然气 48 m³。

2.3 天然气水合物开采的模拟

Mallik 水合物的开采试验只是一种短期行为。其初衷并不在于开采,而是检验陆上水合物矿藏的开采技术和方法,以及用短期开采试验所获之数据(热激和减压与释气的关系、释气流速、释气持续的时间等)来建立长期的开采模型。

Lawrence Berkery 国家实验室和日本石油公司的学者依据 Mallik 的热激和减压开采试验所取得的参数建立了 LBNL 和 JOE 两个天然气水合物长期开采的模型。应用 LBNL 模型计算出了热激法 120 h 分解出来的气体累计量,与工程开采的数量相一致。应用 JOE 模型推算出的 10 年开采所产生的累计气体量则显示出,注入热卤水的热激法开采 0.02 年(即 7 天)后就没有气体分解出来了,说明热激法中由于岩石和水合物热导率很低,开采不能持久。而减压法开采则产气可以维持若干年,并且 1~10 年

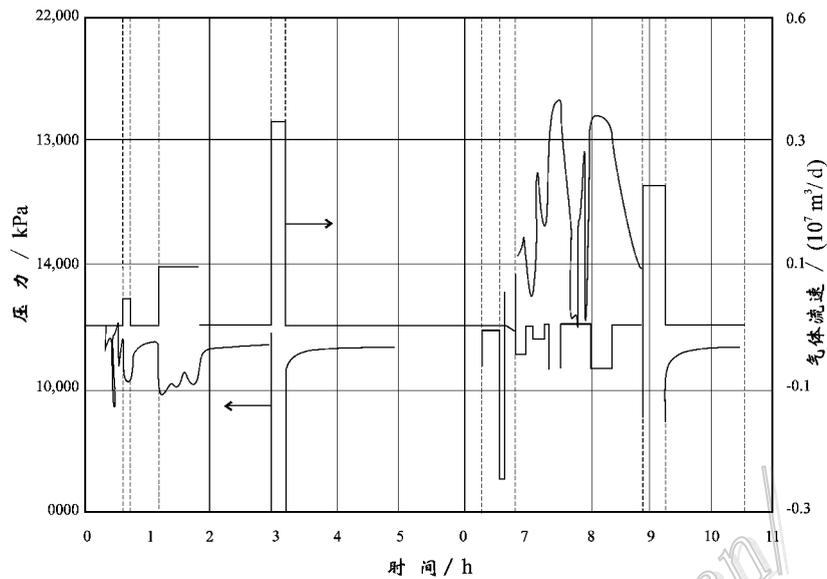


图 13 5L-38 孔 1 090 m 处天然气水合物层减压开采试验, 显示出试验进程中减压与水合物分解所释放之气体流速的对应关系(据 Sloan et al., 2007)

图内上部曲线为气体流速, 下边曲线为压力变动, 注意在 0.5、1、2、3 及 9 h 时的释气峰, 7-8 h 时的释气波动

Fig. 13 Mallik 5L-38 depressurization test at 1 090 m, showing the pressure change with time(after Sloan et al., 2007)

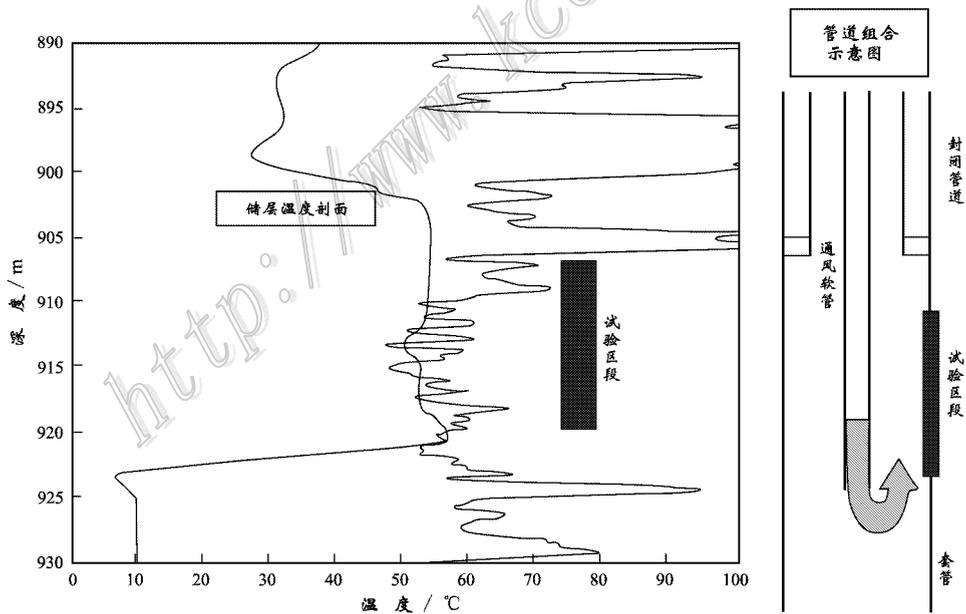


图 14 5L-38 孔的水合物热激开采试验图(据 Sloan et al., 2007)

Fig. 14 Mallik 5L-38 thermal stimulation test(after Sloan et al., 2007)

的长期累积产气量也高于热水循环法和热水分注法若干倍(图 16)。

应用上述 2 个模型预测了 Mallik 矿井的长期产气量。计算结果表明, 短期(5 天) 预测累计产气量 2

个模型间的差别为 3.7 倍, 预测 3 年期的累计产气量时, 两者算出的结果差别增大至 5 倍(减压 + 热激) 和 290 倍(减压法)。这说明这些模型还不适于预测矿井的长期生产。

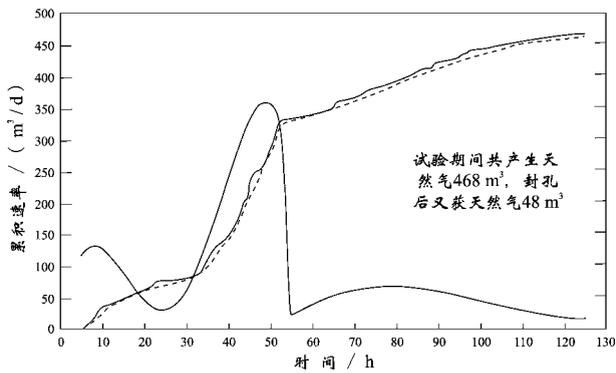


图 15 Mallik 5L-38 井的热激开采试验及结果
(据 Sloan et al. 2007)实线为释气速度(小时平均值),点线为累积释气量

Fig. 15 Mallik 5L-38 gas production on thermal test
(after Sloan et al. , 2007)

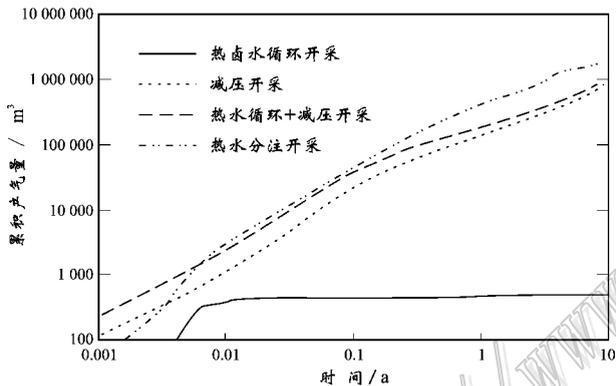


图 16 Mallik5L-38 井十年开采产出累积气体量的模拟推算值(据 Sloan et al. 2007)

Fig. 16 Cumulative gas production at Mallik 5L-38 on the modeling calculation(after Sloan et al. , 2007)

2.4 大陆天然气水合物开采的前景

上述 2 例开采试验的结果表明,大陆冻土带天然气水合物的开采方法和工艺是较可行的。在这 3 种方法中,以减压法最为适用,它开采持续的时间长、费用低,适合于长期开采。热激法不仅费用高,而且作用时间短,不适于单独开采。今后,更经常的方法可能是减压法或减压与试剂注入法配合使用。但是,上述结论只是短期开采试验得出的,用于长期生产开采还有待更深入细致的试验和研究。此外,开采试验还没有触及到开采的经济效益。因此说,当今天然气水合物尚未进入到工业开采的阶段。

从开采方法、工艺技术和开采成本方面综合考虑,工业开采还对水合物矿藏的规模、产出条件和矿

田结构构造等都有严格的要求:① 水合物矿藏要具有较大的规模和储量,足以维持 3~5 年以上的工业开采,一些学者提出的最低规模是,一个矿田的甲烷储量应在 $(1\sim 5)\times 10^8\text{m}^3$ 以上;② 水合物储层的结构应属于类型 1,即水合物层之下拥有较厚的游离气体+水的两相流体层,以有利于长期的减压开采;③ 冻土带之下的水合物储层最好处于接近天然气水合物相平衡的温-压条件,在该条件下稍微的温-压改变就能使水合物发生分解,释放出气体。有人认为,如果在水合物压力稳定的条件下,储层的温度偏离相平衡曲线 7°C 以上(也就是层温低于平衡温度 7°C 以上)就不适于开采,因为这时开采技术的难度很大,开采的成本也过高。如果可以使用废旧的油井进行开采(如在西伯利亚油气田)则费用会更低些。

有许多已探明的大陆水合物矿藏能满足上述产出和技术条件。因此,美国地质调查局联合一些石油公司自 2003 年开始制定并实施了阿拉斯加北坡水合物矿田的开采计划,一方面试验长期开采的技术方法,另一方面着手制造适于极地开采的通用设备。加拿大和日本于 2008 年也携手对 Mallik 矿田进行了第二次开采试验,并着重研究成本较低的减压法的长期开采问题。美国还宣布在墨西哥湾找到了适于海底开采的“富矿(sweet spot)”。日本也宣称准备于 2017 年开始开采南海海槽的水合物矿藏。应该说,走在海洋前面的大陆水合物的工业开采时代已为期不远了,也许就在最近的 10 年、20 年。

还需指出,现有的研究都是与极地永久冻土带以及含油气盆地相联系的。中国青海天峻县木里地区的水合物矿点,地处中低纬度的青藏高原永久冻土带,并与含煤盆地相联系,是一种新类型的高海拔冻土带矿藏,国内外均无资料可以借鉴。为了更好地查清这一新类型矿藏的开发远景,及其对青藏高原气候变化、冰川融化和其他工程建设等安全稳定性的影响,进一步研究中国高原地区永久冻土带水合物的形成、分布规律及水合物储层的赋存状态,应是当务之急。

3 天然气水合物的环境效应及建议

3.1 环境效应

谈到大陆天然气水合物的开发利用,就不能回避开采可能带来的风险,这就是与天然气水合物开发相关的环境问题。

甲烷是一种活动性很强的温室气体,其温室效应的强度是 CO_2 的 20 倍。水合物释出甲烷所产生的环境效应主要是引起气候的加速变暖以及诱发地质灾害。全球水合物中的甲烷量约为大气中甲烷总量的 3 000 倍。只要有水合物甲烷总量的 0.5% 释放到大气层中,就足以引起全球气候的加速变暖。如发生于 6.35 亿年前(新元古代)的大规模水合物溶解事件,甲烷大量释放,形成碳酸盐帽广泛分布的“雪球地球”(Kennedy et al, 2001),引发了地球气温快速上升,使得地质历史上时间最长的冰川期走向终结。又如古新世末发生过底栖有孔虫的灭绝事件,也被认为是水合物大量分解,甲烷气体进入海水,造成海水缺氧所致。

永久冻土带或多年冻土带占地球面积的 1/5,其冰川淡水资源却占地球总量的 4/5。随着地球的变暖,气温的上升,可能使越来越多的水合物分解,释放出大量的甲烷气体进入大气层,从而增强了温室效应,使气候进一步变暖,造成恶性循环。

现在,环境研究做得比较多的是北极地区。已有的资料表明,从 1976~2006 年,北极地区的气温平均上升了 $4\text{ }^\circ\text{C}$,阿拉斯加的育空河地区从 1985~2006 年,气温也上升了 $3.2\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。专家们告诫说,格陵兰岛和整个北极地区的冰层正在后退,冬天时多达 $1\,500 \times 10^4\text{ km}^2$ 的冰盖正在缩小,第一个无冰之夏可能会在 5~50 年内出现。这将大大地改变北极生态环境的方方面面,包括海上交通、永冻带、动植物和人类赖以生存的环境,以及矿产资源的开发等等。所有这些都涉及到各有关国家的政治经济利益,也因此引发了科学界的高度关注。在这当中,有关永冻带和北极大陆架海底水合物对气候变化的影

响是一个重要方面。但早期的研究多偏重于对西伯利亚冻土带水合物释出甲烷的观测,只是从 1994 年俄罗斯科学院远东分院的伊戈尔·谢米列托夫才开始扩大到东西伯利亚海和拉普捷夫海约 $200 \times 10^4\text{ km}^2$ 海域的考察。迄今,共约 10 个航次,先后参加这一项目的还有美国、挪威等国的科学家。报告称,在上世纪整个 90 年代都没有发现海水中的甲烷有任何升高。但从 2003 年起,就开始出现了越来越多的甲烷异常区。监测结果表明,在超过 80% 的深层海水和超过 50% 的浅层海水中,甲烷含量大约比普通海水高 8 倍。在某些海域还可看到甲烷气泡直接从海底冒出,形成“甲烷烟囱”或甲烷羽。这清楚地表明,海水中的甲烷异常不仅来自西伯利亚陆上冻土带融化的河水,更应包括陆架海底永冻层下水合物层的融化。报告还指出,海底的永久冻土层含有巨量的碳,释放出的甲烷气体将导致大气温度升高,进而形成正向反馈旋回,使得更多的甲烷气体从永冻层中释出,令全球变暖进一步加剧。

青藏高原是南、北两极以外冻土、冰川覆盖面积最大的地区,其面积近 $160 \times 10^4\text{ km}^2$,占亚洲(中央亚洲)多年冻土区的 75%,占世界多年冻土面积的 7%(周幼吾等 2000,黄朋等 2002)。青藏高原还拥有冰川 46 289 条,冰储量约为 $5\,590\text{ km}^3$,占亚洲山地冰川储量的近一半(48%)(施雅风,2000)。在世界中低纬度国家中,中国是高原冰川最丰富的,年融水量达 $605 \times 10^8\text{ m}^3$ 。

图 17 是青藏高原及邻区山脉与海拔高于 3 000 m 山地的分布图,结合现代冰川雪线和多年冻土分布下界的海拔高度表(表 4),可大致推断出冰川、冻土分布的基本轮廓。

表 4 中国西部现代冰川雪线和多年冻土下限的海拔高度(据施雅风,2000)

Table 4 Heights above sea level of the recent glaciers and permafrost in western China (after Shi, 2000)

编号	山区	雪线高度 / m	多年冻土分布下界 / (海拔高度 / m)	相差值 / m
1	阿尔泰山	2 800~3 350	2 200~2 800	550~600
2	天山	3 600~4 300	2 700~3 100	900~1 200
3	祁连山	4 400~5 400	3 500~3 900	900~1 500
4	昆仑山	4 500~6 000	3 900~4 200	600~1 800
5	喀喇昆仑山	5 000~5 600	4 400	600~1 200
6	唐古拉山	5 400~5 700	4 600~4 700	800~1 000
7	冈底斯山	5 800~6 000	4 800~5 000	1 000
8	念青唐古拉山	4 600~5 600	4 800	-200~800
9	横断山	4 600~5 500	4 600~4 900	0~600
10	喜马拉雅山	4 300~6 200	4 900~5 300	-600~900

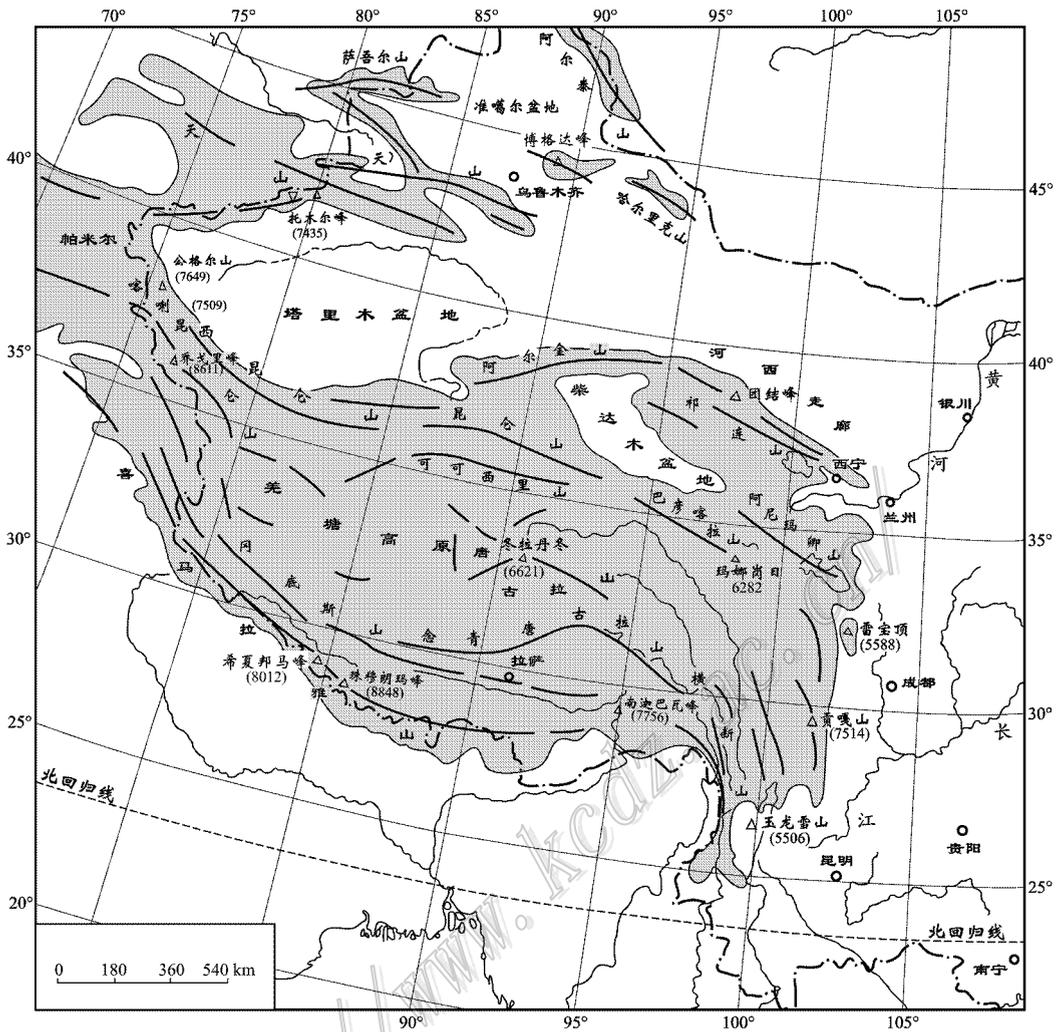


图 17 中国西部山脉及海拔 3 000 m 以上山地(阴影部分)的分布图(据施雅风, 2000)

Fig. 17 Distribution of mountains and plateaus in wesernt China(after Shi, 2000)

毫无疑问,这是一个冻土、冰川广泛分布的地区,因而被称为地球的第三极。对青藏高原环境的研究,尤其是对反映比较敏感的冰川,前人做了不少工作,所获之主要认识可归纳如下:① 上世纪 60 年代以前,大部分冰川处于退缩状态;60 年代至 70 年代初,呈前进或稳定状态的冰川过半;70 年代(1973~1981) 2/3 的冰川处于退缩状态;从 80 年代起,大部分冰川以退缩为主(施雅风, 2000)。这样一个变化规律与北半球的统计结果基本相一致(世界冰川监测服务处出版资料),只是其变化节奏相应提早了 10 来年;② 新近的研究也进一步证明,全球变暖可使地处高海拔、接近赤道的高原地区的气温出现迅

速升高;③ 受中、印等国大量矿物燃料和木材燃烧的影响,喜马拉雅冰川表面由光滑变为粗糙,也即由有利于热反射的表面变成吸热的表面,从而又将加速大气温度的升高^①;④ 有专家预测,到 2070 年,高原冰川覆盖面积将减少 43%。这将对高原地区的生态环境产生重大的影响,首先是对河流水系淡水资源的补给,将涉及中国及邻区众多人口生存环境的改变;其次,永冻带面积的缩小或不稳定将涉及其所在地区铁路、公路、水工建筑、油气管道及矿山工程等的安全。

3.2 建议

维护高原冰冻圈环境的稳定或提出对应的策

① 夏伟. 2010. 最濒危的冰川. 美国《新闻周报》, 2010 年 5 月 31 日.

略,是中国地学工作者义不容辞的职责。吸取北极地区的经验,应尽快将天然气水合物的因素引进高原环境的研究中,冰川、冻土、天然气水合物等方面的专家应携手合作开展广泛深入的研究:

(1) 继祁连山木里地区发现水合物(祝有海等, 2009)之后,应下大力气继续调查高原主要冻土区水合物存在的可能性;

(2) 从已有的冰川、冻土与铁路工程的实验观测站中,选择一批合适的网点增设低空大气甲烷和CO₂的监测;

(3) 选择一些规模较大的冻土区,如羌塘盆地、沱沱河盆地等,对它们的汇水湖泊进行水质取样,以及甲烷、CO₂含量的试验性分析;

(4) 利用国内外已有的遥感技术手段,对高原地区的甲烷、CO、CO₂、氦气和温度等的变化进行实时观测,综合研究碳异常的产生和演变,探索其与水合物融化、甲烷释放的关系;

(5) 结合高原地区水合物的分布和冰川、冻土收缩变化的资料,与上述各项监测结果,研究水合物环境效应在高原环境总体变化中所起的作用,在可能的条件下还可进一步研究其效应的正向反馈旋回机制。

References

Collett T S. 1993. Natural gas hydrates of Brudhoe Bay and Kurakuk River area North Slope, Alaska [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 77(5): 913-912.

Crason J. 2000. Messoyakh gas field (West Siberia) [M]. Annals of New York Academy of Sciences, Vol. 912.

Dallimore S R, Collett T S and Uchida T. 1999. Overview of science program, JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well [A]. In: Dallimore S R, Uchida T and Collett T S, eds. Scientific results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada [C]. Geological Survey of Canada, Bulletin 544.

Dobrynin V M, Korotajev Yu P and Plyushev D V. 1981. Long term energy resources [C]. Meyer R G, ed. Poston Ritman: 727.

Huang P, Pan G T, Wang L Q and Hu N J. 2002. Prospect evaluation of gas hydrate resources on Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 21(11): 794-798 (in Chinese).

Jiang G S, Wang D and Tang F L. 2002. Prospecting exploration and

exploitation of natural gas hydrates [M]. Beijing: China University of Geosciences Publishing House. 38-114 (in Chinese).

- Kennedy M J, Christie-Blick N and Sohl L E. 2001. Are Proterozoic cap carbonates and isotopic excursions a record of gas hydrate destabilization following Earth's coldest interval [J]? Geology, 29: 443-446.
- Krasov J and Ciesnik M. 1985. Geological evolution and analysis of confirmed or suspected gas hydrates localities: Gas hydrates in the Russian literature [J]. US Dept. of Energy, DOE/MS/21181-1950, 5.
- Makogon Y F. 1988. Natural gas hydrates: The state of study in the USSR and perspectives for its use [A]. In: The Third Chemical Congress of North America [C]. Toronto: 5-10.
- Makogon Y F. 1997. Hydrates of hydrocarbons, Penn Well [M]. Tulsa: Publishing Co. 482p.
- Max M D, Johnson A H and Dillon W P. 2006. Economic geology of natural gas hydrates [M]. Netherlands: Springer.
- McDonald. 1990. The role of methane clathrates on past and future climate [J]. Climatic Change, 16: 247-281.
- McIver R D. 1981. Long term energy resources [M]. Meyer R F, Olson J C, eds. Boston: Ritman: 713.
- Mims C. 2009. New discovered methane hydrate reserves deep in the ocean show promise for mining [C]. Mining "ice that burns" 2009. June 8.
- Shi Y F. 2000. Glaciers and environment of China [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Sloan E D and Koh C A. 2007. Clathrate hydrates of natural gases (3rd ed) [M]. Boca Raton, London, New York: CRC Press. 537-643.
- Zhou Y W, Guo D S, Qiu G Q, Cheng G D and Li S D. 2000. Permafrost of China [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhu Y H, Zhang Y Q, Wen H J, Lu Z Q, Jia Z Y, Li Y H, Li Q H, Liu C L, Wang P K and Guo X W. 2009. Gas hydrates in the Qilian mountain permafrost, Qinghai, Northwest China [J]. Acta Geologica Sinica, 83(11): 1762-1771 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 黄朋, 潘桂棠, 王立全, 胡宁静. 2002. 青藏高原天然气水合物资源预测 [J]. 地质通报, 21(11): 794-798.
- 蒋国盛, 王达, 汤凤林. 2002. 天然气水合物的勘探与开发 [M]. 北京: 中国地质大学出版社. 38-144.
- 施雅风. 2000. 中国冰川与环境 [M]. 北京: 科学出版社.
- 周幼吾, 郭东胜, 邱国庆, 程国栋, 李树德. 2000. 中国冻土 [M]. 北京: 科学出版社.
- 祝有海, 张永勤, 文怀军, 卢振权, 贾志耀, 李永红, 李清海, 刘昌岭, 王平康, 郭星旺. 2009. 青海祁连山冻土区发现天然气水合物 [J]. 地质学报, 83(11): 1762-1771.