

# 可燃冰的研究现状与思考

熊焕喜 王嘉麟 袁波

(中国石油集团安全环保技术研究院有限公司)

**摘 要** 可燃冰具有燃烧热值高,清洁无污染,分布范围广、资源量大等优势,是石油天然气之后的最佳替代能源。文章概述了可燃冰的形成条件及世界分布情况,阐述了降压开采法、加热开采法、化学试剂注入法、置换法、综合法五种可燃冰开采方法。针对其开采难度大、开采技术与方法尚不成熟、开采成本高,且可能带来温室效应、井喷、海啸、海底滑坡及破坏海洋生态平衡等方面的负面影响,提出了完善法规政策、夯实理论基础、规避安全与环境风险等建议。

**关键词** 可燃冰; 环境风险; 开采方法

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2018.02.002

文章编号: 1005-3158(2018)02-0004-03

## 0 引 言

天然气水合物俗称“可燃冰”(化学式为  $\text{CH}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ),主要成分是甲烷,分布在深海和陆地永久冻土地带,点火能燃烧,且燃烧热值高,清洁无污染,分布范围广,资源量大,储量是现有天然气、煤炭、石油全球储量的两倍,是已探明天然气剩余储量的 140 倍,是后石油天然气时代的最佳替代能源。由于可燃冰的开采可能带来温室效应、海底滑坡和海啸及破坏海洋生态平衡等负面影响,因此开采难度大。目前,世界上超过 40 个国家开展了相关研究,我国从 1990 年开始可燃冰的研究,2011 年启动可燃冰成矿规律“973”“863”项目,2016 年发布《国土资源“十三五”规划纲要》,推进油气勘查开采机制改革,重点探查可燃冰。

## 1 可燃冰概述

### 1.1 可燃冰形成

“可燃冰”的形成须具备 3 个条件:第一,温度条件:  $0 \sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最高不能超过  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,再高即分解;第二,压力条件:  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,30 个以上标准大气压才可能生成;第三,气源条件<sup>[1]</sup>: 烃类气源是形成可燃冰的源泉,没有气源,可燃冰便不存在。除此之外,pH 值、盐度、气体运输通道也是可燃冰形成的重要条件。

### 1.2 可燃冰的世界分布

世界上天然气水合物主要分布在海底,已发现的主要分布区是大西洋海域的墨西哥湾、加勒比海、南

美东部陆缘、非洲西部陆缘和美国东海岸外的布莱克海台等,西太平洋海域的白令海、鄂霍茨克海、千岛海沟、冲绳海槽、日本海、四国海槽、日本南海海槽、苏拉威西海和新西兰北部海域等,东太平洋海域的中美洲海槽、加利福尼亚海滨外和秘鲁海槽等,印度洋的阿曼海湾,南极的罗斯海和威德尔海,北极的巴伦支海和波弗特海,以及大陆内的黑海与里海<sup>[2]</sup>。陆地上分布主要有中国青海木里等。

## 2 可燃冰开采方法

据科学家估计,可燃冰全球总资源量约 10 万亿 t 油当量,可供人类使用 6.4 万 a,仅海底可燃冰储量可供人类使用 1 000 a。虽然全球可燃冰储量巨大,但可燃冰开采技术并不成熟,且在开采过程中极易导致甲烷气体大量逸散,其产生的温室效应是  $\text{CO}_2$  的 20~26 倍。因此目前对可燃冰的开采仍处于试验阶段,主要的开采方法有降压开采法、加热开采法、化学试剂注入法、置换法和综合法等。

### 2.1 降压开采法

降压开采法是通过钻井井眼的压力降或在可燃冰层之下的游离气聚集层中“降低”天然气压力或形成一个天然气“囊”(由热激发或化学试剂作用人为形成),使与天然气接触的可燃冰变得不稳定,从而分解为天然气和水。简言之,即通过降低天然气水合物储层压力促使其分解的一种方法,该方法不需要昂贵的连续激发,在可燃冰现有开采模拟研究中是最简单、成本最小的开采方式,特别适合大规模开采。目前采

取的降压途径主要有利用低密度泥浆钻井以及通过泵压抽出天然气水合物储层下方存在的游离气体和其他流体来降低压力<sup>[3]</sup>。后者应用较多。目前,俄罗斯 Messoyakha(麦索亚哈)气田、加拿大 Mackenzie(马更些)气田及日本爱知县沿岸以该方法为主。

## 2.2 加热开采法

加热开采法又称热激发法,该方法大致原理是保持天然气水合物稳定带压力不变,将热水、热盐水、蒸汽或其他热流体通过注采井从地面泵入水合物地层,通过提高水合物地层的温度,使天然气水合物分解成水和天然气,最后利用集气装置收集分解的天然气。但此方法不足之处在于不易收集。海底的可燃冰不是集中为“一片”,也不是一大块岩石,而是较为均匀地遍布。如何布设管道并高效收集是急于解决的问题。另一缺点是加热法会造成大量的热损失,效率低。特别是在永久冻土区,即使利用绝热管道,永冻层也会降低传递给储集层的有效热量。开采不当还会影响沉积物孔隙度、渗透率等因数,对储层造成大面积破坏<sup>[4]</sup>。

目前世界上通用的加热方式主要有:注入热流体(如热水、热盐水、蒸汽等)、太阳能加热、电磁加热、微波加热等。每种热开采方法各有优缺点。如注入热流体,优点是简单、成本低且能循环利用,缺点是效率低,热量损失较大;太阳能加热高效、清洁、无污染,但易受气候变化影响;电磁加热可迅速加热,易于控制,但需要大量的能量及复杂的设备,成本较高;微波加热易于控制,通过波导管传输,但缺乏大功率磁控管。加拿大、日本、美国多采用加热法,且普遍利用注入流体加热。

## 2.3 化学试剂注入法

化学试剂注入法是通过从井孔向水合物储层中注入化学试剂如甲醇、乙醇、乙二醇、丙三醇等,改变水合物地层温度及孔隙压力,改变水合物地层相平衡条件,引起水合物分解。由于水合物分解产生的水会稀释化学试剂,效果大大减弱,同时化学试剂对海洋和地下水造成损害及污染,且试剂成本较高,商业价值低,不适合大规模使用,所以应用此方法的国家比较少<sup>[5]</sup>。

## 2.4 置换法

又称气举法,该方法的原理是将 CO<sub>2</sub> 或其他气体(主要利用 CO<sub>2</sub>)注入海底的可燃冰储层,因 CO<sub>2</sub> 较之甲烷更易与水结合形成水合物,因而可将可燃冰中的甲烷分子“挤走”,从而将其置换出来。该方法

的优点在于能将 CO<sub>2</sub> 储存于地层下,缓解温室效应,发展低碳经济,有良好的商业价值前景和环境效益,也能有效地减少开采过程中的井喷和井塌事故。但也具有明显的缺点:置换效率低,水合物分解速率慢,大规模的收集、运输 CO<sub>2</sub> 气体易引起安全环保问题。目前美国和日本使用此方法较多<sup>[6]</sup>。

## 2.5 综合法

综合法是综合利用降压开采法和加热开采法的优点对天然气水合物进行有效开采。其具体方法是先用热激发法分解天然气水合物,后用降压法提取游离气体。目前,俄罗斯 Messoyakha(麦索亚哈)气田、加拿大 Mackenzie(马更些)气田主要使用该法开采天然气水合物。我国也可借鉴综合法开采可燃冰。

以上每种方法都有其自身的优缺点,要使用哪种方法,需具体问题具体分析,目前世界上大部分国家较为认可的方法是 CO<sub>2</sub> 置换法,因为此方法在提取天然气的同时,还能发展低碳经济,具有双重优点。

# 3 可燃冰开采的风险与困难

## 3.1 环境风险

1个单位可燃冰分解可产生168个单位的甲烷气体。甲烷气体的温室效应能力是 CO<sub>2</sub> 的 20~26 倍左右,海底天然气水合物中甲烷含量大约是大气中的 3 000 倍,而可燃冰矿藏极易受到破坏,哪怕受到最小的破坏,都足以导致甲烷气体的大量泄漏,加速温室气体效应,最终导致海平面上升,全球变暖<sup>[7]</sup>。可燃冰分解后产生甲烷,但大部分都溶解于海水中,并且转化成了 CO<sub>2</sub>。可是,甲烷没有进入大气并非表示这是无害的,转化成 CO<sub>2</sub> 的甲烷将会增加海水的 CO<sub>2</sub> 浓度,会对海洋生物造成一定的影响,如鱼类“中毒”、迷路等,严重时,可导致地球海陆生物的灭绝。

此外,海底可燃冰稳定性较差,一旦汽化,“封存”它的海底沉降物会失去稳定,不仅会对海底管道、开采平台和科学仪器造成破坏,而且还有可能造成大陆架边缘动荡从而引发海底塌陷、滑坡、井喷等地质灾害,最坏可能导致海啸。

## 3.2 技术难题

海洋可燃冰绝大多数分布在 300~3 000 m 水深的海底沉积物中,储存条件复杂、埋深浅、大面积分布,其分解出来的甲烷很难聚集在某一地区内收集;开发过程中易引发工程地质灾害、温室效应等,寻求安全、可靠、经济的开采技术面临着巨大的挑战。开采技术层面尚未找到一个适合现状的高效率、低风险

方法。此外,勘探找矿选区难度大。海域水合物地震勘查识别的精度和准确性较低,冻土区水合物勘查识别仍缺乏有效方法<sup>[8]</sup>。

在可燃冰样品钻取、保存、测试和分析实验等方面缺少相应的技术、设备和技术标准。目前国际上尚无成熟的商业化开采技术可供借鉴,针对水合物特殊储层的井孔及储层保护等钻完井技术还不成熟。基于降压、加热及置换等原理的天然气水合物开采方法存在一些实际操作问题,如井筒出砂、开采装备成本过高等。

### 3.3 经济挑战

在目前的技术水平下,可燃冰自身所含的能量远低于将其从埋藏处开发输送至地表所需的能源消耗,即经济效益很低甚至负利润。目前可燃冰开采成本高达200美元/ $\text{m}^3$ ,而开采页岩气的成本仅3美元/ $\text{m}^3$ ,开采天然气的成本约1美元/ $\text{m}^3$ 。可燃冰给世界带来了希望,但也带来了困难,由于技术与成本问题,可燃冰开采要进入大规模商业开采仍需很长一段时间,需要先解决技术问题,成本才能随之降低<sup>[9]</sup>。

## 4 建议

①完善政策、法规与标准。国家应制定可燃冰开发利用及产业化部署及相关政策、法规。制定可燃冰矿业权管理及监管(包括招投标、储量评审、勘查开发监管等)制度。制定全面涵盖陆域和海域的可燃冰勘查、开采、运输等较为系统的技术规范与标准。提供财税政策的支持和优惠。如国家为高校、企业及其他科研院所提供大量的科研资金或给予政策上的优惠,调动尖端专业人员的参与热情与积极性。

②夯实理论基础,突破技术难题,降低经济成本。国家要重点展开对可燃冰理论研究的资金支持与优惠,高校、企业及其他科研院所要投入大量的专业人员,制定可燃冰专项课题、联合研究,长期研究、学习美国、日本等先进经验,夯实理论基础。高校企业科研院所要以技术攻关为主,夯实理论基础也是为攻关技术服务,建立国家重点实验室与现场实验,开展室内模拟实验与场地实地实验双轨制,借鉴国外先进技术,自主创新,创建自己的技术开发体系。在理论与技术不断成熟的条件下,成本也会随之降低,但在整

个过程中,也应该注意节约成本。

③规避安全与环保风险。如前文所述,由于甲烷的自身特性,如开采不当,会造成温室效应,促使海水、地层温度升高,有可能造成可燃冰自动分解,形成恶性循环,同时还可能导致井喷、海底滑坡、海底生态破坏等问题。可燃冰在陆地主要分布在冻土地区,海拔高、人烟稀少、生态环境脆弱,环保要求更高。因此,如何安全又环保地开采可燃冰应引起高度重视。此外,在勘探与开采可燃冰时,应在本国专属经济区与大陆架范围内,而不能超越此界限,否则会侵犯他国领土主权。

## 5 结束语

可燃冰是石油天然气之后的最佳替代能源,为人类带来了新的希望,目前世界上可燃冰开采方法与技术尚不成熟,因此,可燃冰必须在政策法规标准较全面,理论与技术切实可行,经济成本可接受,安全环保措施较完善的前提下,大规模商业开采才能从理论成为现实。

### 参考文献

- [1] 张永勤.国外天然气水合物勘探现状及我国水合物勘探进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(10):1-8.
- [2] 张洋,李广雪,刘芳.天然气水合物开采技术现状[J].海洋地质前沿,2016,32(4):63-68.
- [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.
- [4] 冯望生,宋伟宾,郑箭的,等.可燃冰的研究与开发进展[J].价值工程,2013(8):31-33.
- [5] 刘超.可燃冰开发环境风险法律规制制度探究[J].中国地质大学学报(社会科学版),2017(2):39-48.
- [6] 贾怀东,郑瑞锋.可燃冰开发或引发环境灾难[J].生态经济(中文版),2012(12):14-17.
- [7] 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(8):54-58.
- [8] 虞洁,王海凤,祁之军,等.未来世界新能源-可燃冰[J].科技与企业,2012(14):186.
- [9] 祁晓津,张康龙.由“可燃冰”引起能源问题的思考[J].中国城市经济,2010(7):264.

(收稿日期 2017-08-08)

(编辑 王蕊)