

# 可燃冰开发及试采技术发展现状综述

汤晓勇<sup>1</sup> 陈俊文<sup>1</sup> 郭艳林<sup>1</sup> 梁法春<sup>2</sup> 王 驰<sup>2</sup>

1. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;

2. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580

**摘 要:**天然气水合物(可燃冰)是由水分子和气体分子(烃类为主)在特定的压力与温度条件下相互接触而形成的笼状类冰结晶化合物。可燃冰的开采一直被视作解决世界能源问题的重要途径。综述了可燃冰开采方法及研究现状,从基本原理、室内试验、数值模拟三个方面对每种开采方法进行系统概括,其中,降压法是目前使用最广、性价比较高的方法。另外,固态流化开采技术由于对我国南海海域深海可燃冰开采具有借鉴价值,因而也成为当前我国可燃冰开采研究的热点问题。同时,介绍了可燃冰矿藏现场试采现状。最后,对可燃冰的开采情况进行总结,并提出针对性建议,指出未来可燃冰的研究方向。

**关键词:**可燃冰;开采试采;技术发展

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.01.002

## Development Status of Combustible Ice Mining and Test Production Technologies

Tang Xiaoyong<sup>1</sup>, Chen Junwen<sup>1</sup>, Guo Yanlin<sup>1</sup>, Liang Fachun<sup>2</sup>, Wang Chi<sup>2</sup>

1. China Petroleum Engineering & Construction Corp. Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;

2. China University of Petroleum, College of Pipeline and Civil Engineering. Qingdao, Shandong, 266580, China

**Abstract:** Natural gas hydrate (combustible ice) is a cage-like ice crystal compound formed by contact of water molecules and gas molecules under specific pressure and temperature conditions. The exploitation of combustible ice has always been seen as a vital way to solve global energy issues. This paper firstly introduces the basic characteristics of combustible ice, then describes the current research methods and research status of combustible ice mining, and systematically summarizes various mining methods from three aspects: basic principle, laboratory test and numerical simulation. Among them, the method of depressurization is the one with the most extensive application and relatively higher cost performance at present, and solid fluidization mining technology has become a hot issue in China's flammable ice mining research due to its reference value to the flammable ice mining in the deep sea of the South China Sea. Subsequently, the status of on-site test mining of combustible ice deposits was presented. Finally, combined with the status of combustible ice mining at home and abroad, the mining situation of combustible

收稿日期:2019-11-13

基金项目:中国石油工程建设有限公司研究课题“可燃冰储运技术现状与发展趋势研究”(CPECC 2018 JC 01)

作者简介:汤晓勇(1970-),四川南充人,教授级高级工程师,硕士,主要从事油气田地面工程技术管理与研究工作。E-mail: tangxiaoyong@cnpc.com.cn

ice mines is summarized, and some suggestions are put forward, pointing out the research direction of combustible ice in the future.

**Keywords:** Combustible ice; Mining & test mining; Technical development

## 0 前言

天然气水合物(可燃冰)是由水分子和气体分子(烃类为主)在合适的温度压力作用下形成的类冰状化合物,主要分布在深海的沉积物或陆域永久冻土层中,具有非化学计量性、相平衡特性、笼体结构的特殊稳定性、自保护特性等性质。形成水合物的气体组分包括甲烷、乙烷、丙烷、丁烷以及它们的同系物等烃类气体和少数非烃类气体,这些气体分子存在于由水分子构成的笼形空腔结构内。由于形成天然气水合物的烃类物质主要是甲烷(含量>99%),因此通常又称甲烷水合物<sup>[1]</sup>。

可燃冰中蕴含了巨大的天然气资源,1 m<sup>3</sup> 可燃冰相当于 160~180 m<sup>3</sup> (标准)的天然气,以此估算,全球可燃冰矿藏中储藏了约  $1.8 \times 10^{16} \sim 2.1 \times 10^{16}$  m<sup>3</sup> 天然气资源,其总量相当于全球已探明常规化石燃料总碳量的 2 倍,因此可燃冰有望改善现有以煤炭、石油等非清洁能源主导的能源结构,目前对可燃冰的研究受到了世界各国的高度重视。

## 1 可燃冰开采技术研究现状

目前已经提出的可燃冰开采方法较多,具有代表性的包括降压法、注热法、置换法、化学抑制剂注入等。由于生产条件的限制,可燃冰开采研究尚主要集中在室内实验和数值模拟两方面。

### 1.1 降压法

降压法是通过抽取地下水或气举等手段使水合物储层压力降低,当水合物压力降至平衡压力以下时会自发地发生分解,从而实现水合物的开采。降压法开采见图 1,由于其操作相对简单,并且可以相对快速地促使大量天然气水合物分解,该方法被认为是最具经济价值的可燃冰开采方法。同时,需要注意的是,降压法开采过程中容易引起储层温度过低,从而引发结冰或者水合物

二次生成的现象,造成渗透路径的堵塞,影响开采效率,因此需考虑合理手段予以缓解。

#### 1.1.1 降压法室内实验研究

Yousif M H 和 Sloan E D<sup>[2-3]</sup> 利用 Berea 砂岩的岩心作为载体生成了天然气水合物,并进行了降压分解实验。验证了在岩心内生成的天然气水合物分布均匀且稳定,分解过程中存在较为明显的分解前缘;水合物分解速度受分解压差和分解过程中的驱动力影响,且呈现正相关规律。

Kono H O<sup>[4]</sup> 等人在实验温度 273.5 K, 压力范围 6.8~13.6 MPa 的情况下,对不同粒径多孔介质中水合物的生成和降压分解过程进行了研究。通过减压法测量分离速率,从实验结果推导了动力学解离速率方程和反应顺序。通过实验发现,可以通过控制沉积物的性质来调节解离速率,并推导了反应速率方程。

Hong Huifang<sup>[5]</sup> 使用实验装置对具有下伏气的水合物藏进行降压分解实验,检验了地层性质、操作条件和动力学行为等对分解的影响。

Lee J 等人<sup>[6]</sup> 用长 30.4 cm, 直径 3.81 cm, 孔隙度 31% 的 Berea 岩心生成水合物,并依据实验结果得出了降压幅度与水合物分解的关系。

冯自平等<sup>[7]</sup> 通过对多孔介质中水合物的降压分解模拟实验初步建立了降压分解的数学模型。

李淑霞等人<sup>[8]</sup> 利用模拟开采实验装置,对包含水合物的沉积物体系进行降压实验,得出了降压分解影响因素。

Taewoong A 等人<sup>[9]</sup> 在实验中利用 25 cm 泥层和 50 cm 的砂层来进行泥沙混合层的模拟实验,实验对饱和度和为 50% 的甲烷水合物进行降压分解,结果表明产水先于产气且气体扩散会加速水的流动。

由此可见,前人通过实验对水合物的生成过程以及降压法开采水合物的影响因素进行了较为深入的研究,揭示出分解压差、降压幅度、水合物孔隙率等因素均会影响开采速率,并形成了水合物分解速率的计算公式。后续还需对提高降压法开采速率和防治降压开采过程中可能出现的井壁失稳、储层变形等问题展开研究。

#### 1.1.2 降压法数值模拟研究

Burshears<sup>[10]</sup> 在前人研究的基础上建立了用于具有下伏气藏特点的天然气水合物的降压开采模型,建立了对应的温度分布和边界条件约束,并对孔隙介质中的流体流动进行描述。研究成果揭示了该种生产方式下的

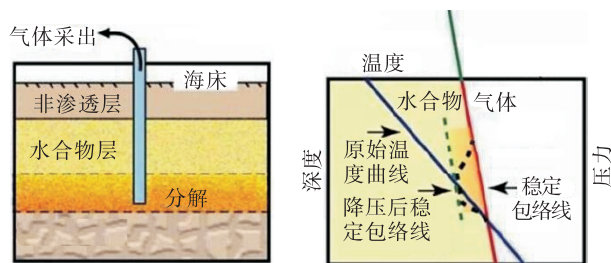


图 1 降压法开采示意图

Fig. 1 Schematic diagram of decompression mining method

产量规律、水合物分解特征等问题。

Yousif M H 等人<sup>[11]</sup>基于等温降压过程,建立了多孔介质中水合物分解和分解产物运动模型,以质量流量作为各种状态表征值,实现了地层中水合物、天然气和原态水的饱和度分布模拟,同时可用于开发过程中天然气、分解水的时域流量分析。模拟结果接近实验下的 Berea 岩心结果。

陈科等人<sup>[12]</sup>以均一孔隙度为前提,建立了包含分解区、水合物区和分解完全区的水合物降压分解模型,考虑了气相和水相的流动和水合物分解过程热力学交换问题。对分解前缘的压力、温度变化进行了预测,揭示了分解区、水合物区和分解完全区的温降比对规律和水合物饱和度分布规律。

白玉湖等人<sup>[13]</sup>建立了开采下伏气的水合物藏降压开采模型,综合考虑了气-水-水合物-冰多相相渗流过程、水合物分解动力学过程、水合物相变过程、冰-水相变过程、热传导、热对流、渗透率变化等对水合物分解的影响,亦基于模型分析了降压过程中下伏气、水合物藏中温压变化规律和饱和度特征,提出了下伏气的开采可有效延长水合物藏的开采时间和提高产量。

Shahbazi A<sup>[14]</sup>建立了包含气、水、水合物、冰的三维水合物藏降压开采模型。该模型综合考虑了降压开采中基于介质热传导和气水渗流的水合物分解动力学、水合物二次形成等问题,可以较为精确地实现第三类水合物藏的开采模拟。

周小玲等人<sup>[15]</sup>利用 Masuda 渗透率模型,通过对水合物储层降压分解的数值模拟,获得了不同时间点储层中流体的分布情况以及分解过程中温度和压力的变化情况。

从降压法开采模拟报道来看,对降压法的数值模拟研究通常以 Kim-Bishnoi 动力学模型描述水合物相变过程,热力学条件、地层压力变化、地层渗透性等是模拟中的主要考虑因素。

目前,Mallik 冻土区、日本 Nankai 海槽、以及我国南海海域水合物的现场试采均采用了降压法,证明了其在水合物开采方面的可行性和适用性。

## 1.2 注热法

注热法是通过某种方式提高水合物储层温度,使其高于水合物存在的平衡温度而使水合物分解。注热法开采见图 2,表 1 列举了常见注热法及其优缺点。

注热过程中消耗的热量主要用于储层岩石升温、水合物孔隙间流体升温、水合物分解吸收以及外界传热;在这一过程中,除了水合物分解吸热以外,其他热量的损失存在浪费问题,同时因为储层中岩石的存在以及孔隙流体导热率的限制,热量的传播范围十分有限,难以

到达离生产井较远的位置。种种原因导致注热开采的效率一般较低,在目前已知的现场开采过程中,注热法很少单独使用,一般配合其他开采方式,作为诱发水合物储层前期快速分解的手段。

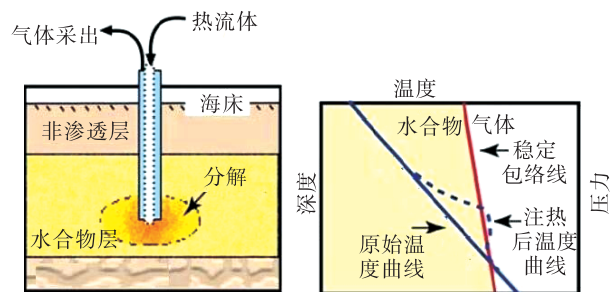


图 2 注热法开采示意图

Fig. 2 Schematic diagram of thermal injection mining method

表 1 不同注热开采方法的优缺点对比表

Tab. 1 Advantages and disadvantages of different thermal injection mining methods

| 方法    | 优点           | 缺点             |
|-------|--------------|----------------|
| 注入热流体 | 简单可循环利用      | 效率低            |
| 电磁加热  | 加热迅速、易于控制    | 需要大量的能量来源且设备复杂 |
| 微波加热  | 易于控制、通过波导管传输 | 缺乏大功率磁控管       |
| 太阳能加热 | 高效、清洁、无污染    | 易受气候变化影响       |

### 1.2.1 注热法室内实验研究

唐良广等人<sup>[16-18]</sup>通过改变注热水速率和温度研究水合物分解过程的产气产水规律,得出注水温度与分解产气速度的大小无关但会影响达到最大产气速度的时间。同时还研究了影响开采能量效率的外部因素以及水合物自身因素。

Pang W X 等人<sup>[19]</sup>在 10 L 的反应釜中进行了注热水法开采实验。实验过程中水合物处于 0.1 MPa 的封闭釜内,随后向釜内注入热水诱发水合物分解。实验结果验证了注水温度、注水量、压力对分解过程的影响,证实了注热对低压状态下水合物分解的促进作用。

黄瑞<sup>[20]</sup>通过注热水驱替实验对不同饱和度、不同初始温度的水合物注热水开采进行了实验研究,得出了在不同情况下的最佳注热水速度、温度和时间。

通过实验研究,已经发现水合物饱和度、注热水温度、注热水速率以及环境压力等因素都会对注热开采过程中水合物的分解效率和产气率产生影响,同时也发现高压环境有助于热水向储层内部运移,但也会引发压力聚集,导致水合物分解区生成次生水合物。

### 1.2.2 注热法数值模拟研究

McGuire P L<sup>[21]</sup>模拟研究了通过注入热水或蒸汽从

水合物沉积物中生产天然气的两种方法,并探讨了水力压裂和减压作为水合物气体生产技术的可行性,同时还描述了适用于水合物储层的水力压裂技术。

Selim M S 等人<sup>[22]</sup>提出了一种多孔介质在热刺激下的水合物分解模型。该模型将分解视为边界处产生了气体和水。该边界将含有气体和水的分解区与含有水合物的未分解区分开。推导了守恒方程的相似解,可用于数值计算。针对模拟饱和蒸汽和热水热刺激的两种情况,给出了模拟过程中的热通量,温度曲线和气体压力分布。

Moridis G J 等人<sup>[23-24]</sup>建立了水合物分解的平衡模型和动力学模型,可以针对降压法、注热法、化学抑制剂注入法进行模拟。Moridis G J 提出对于Ⅰ类水合物藏单独降压开采即可,Ⅱ类水合物藏可以利用下伏自由水进行注热开采,Ⅲ类水合物藏需要降压和注热联合开采。

唐良广等人<sup>[25]</sup>基于推导的热力作用下水合物地层温度分布,发展了评价热力法开采天然气水合物的热效率和能量效率的模型。

李淑霞等人<sup>[26]</sup>基于水合物藏热力开采的机理,建立了数学模型并编制了软件,对影响水合物藏注热开采效果的参数进行了敏感性分析。研究表明,分解前缘移动速度和累积产气量主要受孔隙度、注热温度、初始水合物饱和度、水合物藏初始温度、分解区导热系数和热扩散系数的影响,而未分解区的热力学参数对注热开采影响不大。

由于注热开采过程涉及的物理量较多,相关的相变、传热传质问题较为复杂,目前还没有一个模型能够将所有的变量包含在内,但通过之前的研究,已经对实验过程中得出的影响因素进行了验证,并对注热开采的能量效率问题进行了优化。2002 年在加拿大 Mallik 地区开展的试采表明,注热法的热量渗透率较低,损失较大,但可作为防止井筒水合物堵塞的辅助方法。如果可以解决热量损失大、能源利用率低的问题,注热法还是拥有非常广阔的应用前景。

### 1.3 置换法

置换法是利用了  $\text{CO}_2$  或比甲烷更容易形成水合物的流体将甲烷置换出来,其开采原理见图 3。置换过程中释放的热量可以促进水合物分解并驱使扩散的气体填充到地层孔隙中。置换过程不牵扯相变,因此较为安全,同时可以将温室气体封存海底,缓解陆地的温室效应。故该方法提出后引起了相关研究人员极大的兴趣。但研究后发现该方法置换效率不高,置换所需条件较为苛刻,同时  $\text{CO}_2$  容易渗透到开采井中,带来新的分离问题。目前置换法的商业应用较少,但一直是研究热门。

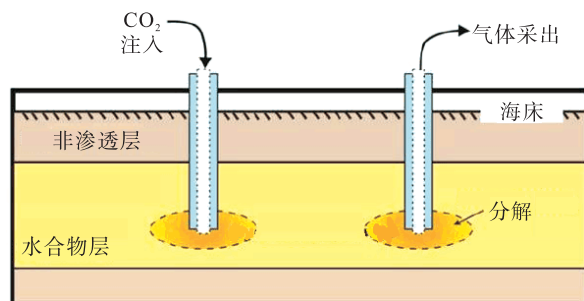


图3 置换法开采示意图

Fig. 3 Schematic diagram of displacement mining method

置换法的设想最初由 Ebinuma T<sup>[27]</sup>在 1993 年提出,1996 年 Ohgaki 证明了向  $\text{CH}_4$  水合物体系中加入  $\text{CO}_2$  依然可以建立新的平衡体系,论证了置换法的可行性。

Hirohama S 等人<sup>[28]</sup>在 274 K、4 ~ 5 MPa 状态下使用液态  $\text{CO}_2$  实施甲烷水合物的置换实验,实验结果: $\text{CH}_4$  在液态  $\text{CO}_2$  中的逸度低于初始水合物中的逸度水平,同时  $\text{CO}_2$  的逸度远高于初始形成的  $\text{CO}_2$  水合物;产生的  $\text{CO}_2$  水合物可能会影响  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  以及  $\text{H}_2\text{O}$  的物质传递,降低开采效率。

Ota M 等人<sup>[29]</sup>采用液态  $\text{CO}_2$  进行  $\text{CH}_4$  水合物置换开采实验研究,实验结果显示,当压力在 3.2 MPa 以上时,甲烷回收率随压力增加而增加,当压力增大到 6 MPa 时,甲烷回收率趋于稳定,不再随压力增大而变化。Ota M 认为置换过程甲烷回收率与  $\text{CO}_2$  相态环境以及压力有关,液态  $\text{CO}_2$  的置换率更高。

周薇等人<sup>[30]</sup>改变  $\text{CO}_2$  的注入压力研究了置换开采过程  $\text{CH}_4$  水合物的置换率以及置换速率。实验结果显示,当  $\text{CO}_2$  注入压力在 3.97 ~ 4.84 MPa 时, $\text{CH}_4$  置换率与置换速率随着  $\text{CO}_2$  注入压力而增大。

李遵照等人<sup>[31]</sup>考察了压力为 2.8 MPa 和 3.25 MPa,温度在 271.2 ~ 276.1 K 范围内的  $\text{CO}_2$  气体置换开采过程。结果表明,温度对置换速率有明显影响,尤其当温度在冰点以上时,置换温度升高可显著提高置换开采速率。

闫素贞<sup>[32]</sup>采用烟气置换  $\text{CH}_4$  实验,研究不同浓度  $\text{CO}_2$  -  $\text{N}_2$  在不同压力和温度条件下的置换过程。结果显示,烟气在相同温度和压力下, $\text{CO}_2$  浓度越高,置换效率越高。

目前主要是采用室内实验方法对置换法开采进行研究,环境压力对置换效率的影响规律。在数值模拟方面的研究主要集中在置换法的开采机理上,对于置换过程涉及到的传质现象以及本构模型的建立还较为欠缺。目前常用的置换方式有两种,第一种为从一个井口注入  $\text{CO}_2$ ,并从另一个井口对甲烷气体进行抽取;第二种为从一个井口注入  $\text{CO}_2$ ,闭井一段时间以供  $\text{CO}_2$  和甲烷气体

充分置换,随后再进行甲烷气体的抽取。如何提高置换效率和置换速率将是该方法的最大挑战。

#### 1.4 化学抑制剂注入法

化学抑制剂注入法通过向水合物矿藏中注入化学试剂,破坏连接水合物分子间的氢键同时改变水合物存在的相平衡条件,促进水合物分解<sup>[33]</sup>,其开采原理见图 4。经验证,该方法可以提高天然气产量,在开采初期可以很低的能量注入即实现水合物的分解。但是抑制剂价格较昂贵,经济性较差<sup>[34-35]</sup>,同时抑制剂对地下水和海洋生态环境都会带来不良的影响,所以该方法的使用受到了限制。

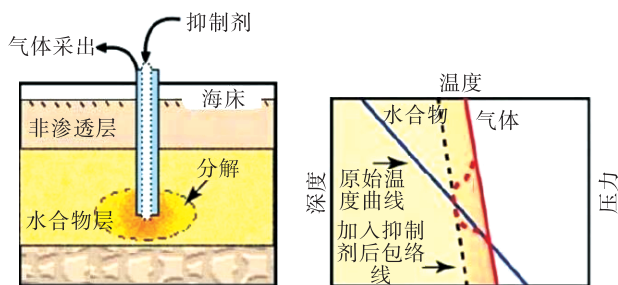


图 4 注入抑制剂法开采示意图

Fig. 4 Schematic diagram of inhibitor injection method

研究人员通过实验对化学抑制剂注入法进行了研究,Kawamura T 等人<sup>[33]</sup>将甲醇溶液注入水合物岩芯中并记录水合物分解过程。实验中改变了甲醇溶液浓度和温度参数,得出了水合物分解动力学参数。

Sira J H 等人<sup>[36]</sup>研究了乙二醇(ethylene glycol)和甲醇(methanol)溶液注入后的水合物分解特征和开采规律。研究表明,水合物分解的瞬时速率是抑制剂浓度、抑制剂注入速率、压力、抑制剂溶液温度和水合物与抑制剂界面(接触)面积的函数。

Fan Shuanshi 等人<sup>[37]</sup>同样进行了注入乙二醇(ethylene glycol)分解水合物实验,得出了分解速度与乙二醇注入速度以及试剂浓度的关系,且较高的乙二醇浓度下,分解所需的能量更低。

可燃冰矿藏存在的特殊地质环境,要求抑制剂不仅可以破坏水合物的相平衡条件,同时需要兼具稳定的化学性质。此外对海洋环境的影响以及开采过程的投入产出比也是研发人员关心的重点。现已研制出的新型水合物抑制剂理论上可以实现以更低的浓度达到诱发水合物分解的效果,在室内这验和现场试采方面具有极大潜力。

#### 1.5 固态流化法

固态流化开采是近几年提出的新型水合物开采方法,对非成岩类型的可燃冰具有很高的开采效率。该方法的开采原理:利用采掘设备直接开掘固态可燃冰,随后将水合物沉积物粉碎成小颗粒,再与海水通过密闭的

立管输送至海洋平台,在海上平台对获得的水合物固体或浆体进行后处理,见图 5<sup>[38]</sup>。该方法实现了原位固态开发,降低了可燃冰分解引起工程地质的灾害风险,也在一定程度避免了温室效应。

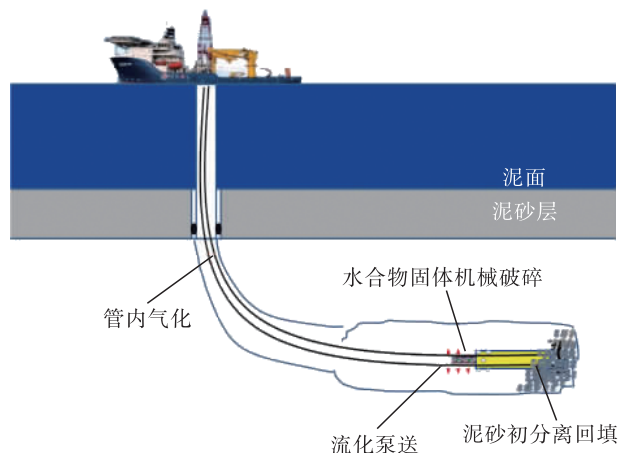


图 5 固态流化法开采示意图

Fig. 5 Schematic diagram of solid fluidization mining method

我国南海海域可燃冰埋深浅,胶结度弱,易于碎化,非常符合固态流化法的使用条件,故此法提出后引起了国内许多学者的研究兴趣。2015 年 4 月,西南石油大学成立了世界首个“海洋非成岩天然气水合物固态流化开采实验室”<sup>[39]</sup>,该实验室可开展大体积固态水合物制备、开采设备破岩能力评级、水合物流化携岩能力评价、水合物管输过程模拟、水合物分解及流变规律研究。据报道,2017 年 5 月,我国在南海北部首次利用固态流化技术实现了试采,获得气体 81 m<sup>3</sup>,纯度高达 99.8%。这一现场试采证明了固态流化法在开采浅层非成岩可燃冰的可行性。

在数值模拟研究方面,周守为等人<sup>[38]</sup>针对深水浅层非成岩天然气水合物开展了一系列的钻采开发和举升规律研究。

#### 1.6 组合开采法

目前,水合物开采过程倾向于将两种或多种方法相结合,这种联合开采法一般以降压法为主并辅以其他方法,从而提高开采效率、安全性以及适用性。常用的联合开采方法有 Sasaki K 等人<sup>[40]</sup>提出的双水平井热水注入法,部分氧化法<sup>[41-42]</sup>,Minagawa H<sup>[43]</sup>提出的电加热辅助降压法,Gupta A 等人<sup>[44]</sup>提出的 CO<sub>2</sub> 置换辅助降压法以及张旭辉等人<sup>[45]</sup>提出的机械-热联合开采法等。

## 2 可燃冰矿藏试采现状

可燃冰因其蕴藏的巨大潜能,受到了各个国家的重视。中、日、美、加、韩、印、俄罗斯以及部分欧盟国家均开展了大量水合物研究工作。其中中、日、美、加四国依托

其国内丰富的水合物矿藏资源实施了现场试开采活动,取得了丰富的成果。

## 2.1 国外现场试采案例

### 2.1.1 加拿大现场试采

加拿大是最早开展水合物矿藏现场试采的国家。2002年初,加拿大联合10余个国家机构在麦肯齐三角洲永冻带地区开展了Mallik水合物试采工程。该工程共布设3口井,其中Mallik3L-38、Mallik4L-38为观测井,负责对生产过程实时监控,Mallik5L-38为生产试验井,负责取心、测井及试开采实验。3月上旬,通过向水合物层注入热KCl聚合物冲洗液实施开采,试开采过程持续5 d,产出甲烷 $470\text{ m}^3$ ,日均产出 $94\text{ m}^3$ <sup>[46]</sup>。

2007年和2008年,加拿大在早期布设的Mallik2L-38试验井中利用降压法再次成功从水合物矿藏中持续稳定地采出水合物,开采分别持续12.5 h和6.8 d,分别产出甲烷气体 $830\text{ m}^3$ 和 $13\,000\text{ m}^3$ 。

### 2.1.2 美国现场试采

美国早在20世纪60年代就开始了可燃冰的研发工作,提出了“似海底反射层”作为可燃冰地带地震识别标识,获得业界的广泛应用。2011年,美国在阿拉斯加北坡顺利完成了IgnikSikumi#1试验井钻井和完井作业,首次采用 $\text{CO}_2-\text{CH}_4$ 置换法实现可燃冰开采,并借助井内喷射泵辅助降低储层压力,促进水合物分解。2012年2月15-18日,向地层注入了 $798\,823\text{ m}^3$ 含有化学示踪剂的 $\text{CO}_2/\text{N}_2$ 混合气体,加入 $\text{N}_2$ 是为了增强气体与自然界甲烷水合物的置换作用。整个试开采工程持续了38 d,其中正式生产30 d,8 d的时间用于修理地面分离器,更换喷射泵等维护工作。在38 d的试验阶段,共生产了甲烷 $28\,317\text{ m}^3$ <sup>[47]</sup>。

本次试采证明了 $\text{CO}_2$ 置换法的开采速率虽与注热法、降压法相比还处于较低水平,但该方法对储层的初始压力、温度等条件敏感性不高,因而适应性更加广泛。同时,置换法在开采过程中产生的废水较少,不仅更加环保也减少了废水携砂冲刷套管及井下设备的几率。

### 2.1.3 日本现场试采

2013年,日本决定实施水合物试采工程,这也是可燃冰开采历史上第一次海域可燃冰试采工程。本次开采使用降压法,并采用砾石填充的防砂措施。3月12日,生产井成功排气,但由于开采过程中砾石的移动导致了筛网的损坏,大量砂土进入生产井通道导致堵塞,开采持续6 d后被迫终止。在6 d的开采过程中共产出甲烷气体 $120\,000\text{ m}^3$ 。

为解决出砂问题,日本于2017年再一次启动水合物试采工程。5月,日本开始在南海海域进行施工,首先使用了先期膨胀GeoForm筛管进行防砂,但由于测试效果

不佳,后期改用了井下膨胀GeoForm筛管,防砂效果明显,随后实现了24 d连续不间断开采,共计产出甲烷气体 $240\,000\text{ m}^3$ <sup>[48]</sup>。

日本的海域可燃冰试采工程说明了海域可燃冰的开采过程的出砂问题较陆域可燃冰更为严重,如果可以有效解决出砂问题,海域可燃冰将有着非常广泛的利用前景。

## 2.2 国内现场试采案例

我国对可燃冰的研究始于20世纪80年代,当前在可燃冰勘探、试采等方面均取得重要进展。中国地质调查局于2011年和2016年在祁连山冻土区进行了两次陆域可燃冰试采试验,并于2017年5月在南海神狐海域组织实施了一次海域可燃冰试采,开启了我国可燃冰资源利用的序幕。

2011年9月,运用降压加热结合的方法对祁连山地区水合物矿藏实施了第一次试采。试采采用了单井直井方案<sup>[49]</sup>,生产过程持续101 h,产气 $95\text{ m}^3$ 。本次试采产气时间较短,产气量较低,但证实了降压试采工艺、控制监测等关键技术在成岩储层中应用的可行性,为陆域试验试采模拟技术积累了经验。2016年10月,提出了“山”字形水平对接井的开采方法,并成功应用于第二次试采试验<sup>[49]</sup>。本次试采主要应用降压的方法并将3口试验井在地下相互连通,从而保证降压作用的作用区域更广。在23 d的时间里,采出甲烷气体 $1\,078\text{ m}^3$ 。

2017年,在我国南海神狐海域由中国地质调查局开展了我国首次海域可燃冰试采试验。试采以降压法为核心,开采连续出气60 d,累计产气量超过 $30\times 10^4\text{ m}^3$ ,最高日产 $3.5\times 10^4\text{ m}^3$ <sup>[50]</sup>,多项指标打破了试采工程的最高纪录。

## 2.3 当前试采技术评价

迄今为止,各国已经进行了多次水合物矿藏实地试采工作。每次试采的成功都表示人类在可燃冰的商业开采之路上又前进了一步,但也应该意识到距离彻底实现商采并使普通居民真正使用上可燃冰矿藏中的天然气资源还面临很多挑战。此外,甲烷作为温室效应强烈的温室气体,应采取可靠的措施保障开发过程可控,把开采过程中的环境问题放在首要位置考虑。此外,当前的各种水合物开采方法都面临成本过高的问题,这要求进一步完善储层评价技术,优化水合物开采工艺,研发关键技术装备,通过技术创新降低开采成本,为最终的商业化积累经验。

## 3 结论与展望

本文对当前水合物开采过程所涉及的开采方法从原理、室内实验、数值模型研究现状等方面进行了评述,

对每种方法的优缺点,研究过程中的经验及问题以及未来研究的重点进行了系统性总结。此外对国内外已经实施的水合物试开采活动进行了介绍。目前,世界范围内包括中国、加拿大、美国、日本共四个国家实现了现场试采,上文所阐述的五种方法在试采过程中均有所利用。试采结果表明,在当前的技术条件下,降压法是使用范围最广、性价比较高的方法。

总体来讲,目前国内外对可燃冰的开发仍处于初步探索阶段,尤其针对储量丰富的海域可燃冰,受储层特性、环境条件、开发经验等影响,尚需开展大量的基础研究和实验研究工作,以实现安全、高效开发。

#### 参考文献:

- [1] 李 化, 罗小武, 江伍英, 等. 天然气水合物储运技术综述 [J]. 天然气与石油, 2006, 24(3): 35-37.  
Li Hua, Luo Xiaowu, Jiang Wuying, et al. Summarization on Storage and Transportation Technology of Natural Gas Hydrate [J]. Natural Gas and Oil, 2006, 24 (3): 35-37.
- [2] Yousif M H, Sloan E D. Experimental Investigation of Hydrate Formation and Dissociation in Consolidated Porous Media [J]. SPE Reservoir Engineering, 1991, 6 (4): 452-458.
- [3] Yousif M H, Abass H H, Selim M S, et al. Experimental and Theoretical Investigation of Methane-Gas-Hydrate Dissociation in Porous Media [J]. SPE Reservoir Engineering, 1991, 6 (1): 69-76.
- [4] Kono H O, Narasimhan S, Song Feng, et al. Synthesis of Methane Gas Hydrate in Porous Sediments and Its Dissociation by Depressurizing [J]. Powder Technology, 2002, 122 (2-3): 239-246.
- [5] Hong Huifang. Modeling of Gas Production from Hydrates in Porous Media [D]. Calgary: University of Calgary, 2003: 9-11.
- [6] Lee J, Park S, Sung W. An Experimental Study on the Productivity of Dissociated Gas from Gas Hydrate by Depressurization Scheme [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51 (12): 2510-2515.
- [7] 冯自平, 沈志远, 唐良广, 等. 水合物降压分解的实验及数值模拟 [J]. 化工学报, 2007, 58(6): 1548-1553.  
Feng Ziping, Shen Zhiyuan, Tang Lianguang, et al. Experimental and Numerical Studies of Natural Gas Hydrate Dissociation by Depressurization in Different Scale Hydrate Reservoirs [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2007, 58 (6): 1548-1553.
- [8] 李淑霞, 陈月明, 郝永卯, 等. 多孔介质中天然气水合物降压开采影响因素实验研究 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(4): 56-59.  
Li Shuxia, Chen Yueming, Hao Yongmao, et al. Experimental Research on Influence Factors of Natural Gas Hydrate Production by Depressurizing in Porous Media [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2007, 31 (4): 56-59.
- [9] Taewoong A, Lee J, Lee J Y, et al. Depressurization-Induced Production Behavior of Natural Gas Hydrate in a Meter-Scale Alternate Layer of Sand and Mud [C] // Paper 360305 was Presented at the 9th International Conference on Gas Hydrates, 25-30 June, 2017, Denver, Colorado, USA. Golden: ICGH, 2017.
- [10] Burshears M, Malone R D, O'Brien T J, et al. A Multi-Phase, Multi-Dimensional, Variable Composition Simulation of Gas Production from a Conventional Gas Reservoir in Contact With Hydrate [C] // Proceedings of the SPE Unconventional Gas Technology Symposium, 18-21 May, 1986, Louisville, Kentucky, USA. New York: SPE, 1986.
- [11] Yousif M H, Li P M, Selim M S, et al. Depressurization of Natural Gas Hydrates in Berea Sandstone Cores [J]. Journal of Inclusion Phenomena and Molecular Recognition in Chemistry, 1990, 8 (1-2): 71-88.
- [12] 陈 科, 刘建仪, 张烈辉, 等. 水合物气藏降压开采数学模型 [J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 93-94.  
Chen Ke, Liu Jianyi, Zhang Liehui, et al. Mathematical Model of Blowdown of Hydrate Gas Reservoir [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26 (1): 93-94.
- [13] 白玉湖, 李清平, 李相方, 等. 下伏气的天然气水合物藏开采模拟 [J]. 科学通报, 2008, 53(18): 2244-2250.  
Bai Yuhu, Li Qingping, Li Xiangfang, et al. Exploitation Simulation of Lower Gas Hydrate Reservoir [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53 (18): 2244-2250.
- [14] Shahbazi A, Pooladi-Darvish M. Behavior of Depressurization in Type III Hydrate Reservoirs [J]. SPE Journal, 2014, 19 (2): 191-205.
- [15] 周小玲, 赵 源, 吴玉国. 天然气水合物降压开采数值研究 [J]. 当代化工, 2018, 47(12): 2669-2671.  
Zhou Xiaoling, Zhao Yuan, Wu Yuguo. Numerical Study on the Exploitation of Natural Gas Hydrate by Depressurization [J]. Contemporary Chemical Industry, 2018, 47 (12): 2669-2671.
- [16] Tang L G, Xiao R, Huang C, et al. Experimental Investigation of Production Behavior of Gas Hydrate Under Thermal Stimulation in Unconsolidated Sediment [J]. Energy & Fuels, 2005, 19 (6): 2402-2407.
- [17] 唐良广, 肖 睿, 李 刚, 等. 热力法开采天然气水合物的模拟实验研究 [J]. 过程工程学报, 2006, 6(4): 548-553.  
Tang Lianguang, Xiao Rui, Li Gang, et al. Experimental

- Investigation of Production Behavior of Gas Hydrate under Thermal Stimulation [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2006, 6 (4): 548 - 553.
- [18] 唐良广,冯自平,李小森,等.海洋渗漏型天然气水合物开采的新模式[J].能源工程,2006(1):15-18.  
Tang Lianguang, Feng Ziping, Li Xiaosen, et al. A New Production Method for Offshore Seep Gas Hydrate Reservoir [J]. Energy Engineering, 2006 (1): 15 - 18.
- [19] Pang W X, Xu W Y, Sun C Y, et al. Methane Hydrate Dissociation Experiment in a Middle-Sized Quiescent Reactor Using Thermal Method [J]. Fuel, 2009, 88 (3): 497 - 503.
- [20] 黄 瑞. 天然气水合物降压、注热开采实验研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.  
Huang Rui. Experimental Study on Dissociation of Natural Gas Hydrate by Heat Injection and Depressurization [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [21] McGuire P L. Recovery of Gas from Hydrate Deposits Using Conventional Technology [C] //Proceedings of the SPE Unconventional Gas Recovery Symposium, 16 - 18 May, 1982, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. New York: SPE, 1982.
- [22] Selim M S, Sloan E D. Hydrate Dissociation in Sediment [J]. SPE Reservoir Engineering, 1990, 5 (2): 245 - 251.
- [23] Moridis G J, Collett T S. Strategies for Gas Production from Hydrate Accumulations under Various Geologic Conditions [C] //Proceedings of the TOUGH Symposium, 12 - 14 May, 2003, Berkeley, California, USA. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003.
- [24] Moridis G J. Numerical Studies of Gas Production from Methane Hydrates [C] //Proceedings of the SPE Gas Technology Symposium, 30 April-2 May, 2002, Calgary, Alberta, Canada. New York: 2002.
- [25] 唐良广,冯自平,沈致远,等.热力法开采地层天然气水合物的热动力评价[J].工程热物理学报,2007,28(1):5-8.  
Tang Lianguang, Feng Ziping, Shen Zhiyuan, et al. Thermodynamic Evaluation of Natural Gas Hydrate Production by Thermal Stimulation [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28 (1): 5 - 8.
- [26] 李淑霞,姜兴兴,姜汉桥,等.天然气水合物藏注热开采敏感参数分析[J].石油钻采工艺,2010,32(2):54-57.  
Li Shuxia, Jiang Xingxing, Jiang Hanqiao, et al. Sensitivity Analysis of Thermal Dissociation of Natural Gas Hydrate [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32 (2): 54 - 57.
- [27] Ebinuma T. Method for Dumping and Disposing of Carbon Dioxide Gas and Apparatus Therefor: US 5261490 A [P]. 1993 - 11 - 16.
- [28] Hirohama S, Shimoyama Y, Wakabayashi A, et al. Conversion of CH<sub>4</sub>-Hydrate to CO<sub>2</sub>-Hydrate in Liquid CO<sub>2</sub> [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1996, 29 (6): 1014 - 1020.
- [29] Ota M, Morohashi K, Abe Y, et al. Replacement of CH<sub>4</sub> in the Hydrate by Use of Liquid CO<sub>2</sub> [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46 (11 - 12): 1680 - 1691.
- [30] 周 薇,樊栓狮,梁德青,等.二氧化碳压力对甲烷水合物置换速率的影响[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2008,32(3):547-550.  
Zhou Wei, Fan Shuanshi, Liang Deqing, et al. Influence of Pressure to Replacement of CH<sub>4</sub> in the Hydrate by Use of CO<sub>2</sub> [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering Edition), 2008, 32 (3): 547 - 550.
- [31] 李遵照,郭绪强,陈光进,等. CO<sub>2</sub> 置换 CH<sub>4</sub> 水合物中 CH<sub>4</sub> 的实验和动力学[J].化工学报,2007,58(5):1197-1203.  
Li Zunzhao, Guo Xuqiang, Chen Guangjin, et al. Experimental and Kinetic Studies on Methane Replacement from Methane Hydrate Formed in SDS System by Using Pressurized CO<sub>2</sub> [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 58 (5): 1197 - 1203.
- [32] 闫素贞. CO<sub>2</sub> 和烟气置换开采天然气水合物研究[D]. 广州:华南理工大学,2015.  
Yan Suzhen. Study of Replacement of Natural Gas Hydrate with CO<sub>2</sub> and Flue Gas [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [33] Kawamura T, Yamamoto Y, Ohtake M, et al. Experimental Study on Dissociation of Hydrate Core Sample Accelerated by Thermodynamic Inhibitors for Gas Recovery from Natural Gas Hydrate [C] //Proceedings of the Fifth International Conference on Gas Hydrate, 13 - 16 June, 2005, Trondheim, Norway. Trondheim: Tapir Academic Press, 2005.
- [34] 钱伯章,朱建芳.天然气水合物:巨大的潜在能源[J].天然气与石油,2008,26(4):47-52.  
Qian Bozhang, Zhu Jianfang. Natural Gas Hydrate: Immense Potential Energy [J]. Natural Gas and Oil, 2008, 26 (4): 47 - 52.
- [35] 何 腾.天然气水合物动力学抑制剂的合成与评价[D].成都:西南石油大学,2017.  
He Teng. Synthesis and Evaluation of Natural Gas Hydrate Kinetic Inhibitors [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [36] Sira J H, Patil S L, Kamath V A. Study of Hydrate Dissociation by Methanol and Glycol Injection [C] //Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 23 - 26 September, 1990, New Orleans, Louisiana, USA. New York:

SPE, 1990.

- [37] Fan Shuanshi, Zhang Yuzhen, Tian Genlin, et al. Natural Gas Hydrate Dissociation by Presence of Ethylene Glycol [J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20 (1): 324 – 326.
- [38] 周守为, 陈伟, 李清平, 等. 深水浅层非成岩天然气水合物固态流化试采技术研究及进展[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(4): 1 – 8.  
Zhou Shouwei, Chen Wei, Li Qingping, et al. Research on the Solid Fluidization Well Testing and Production for Shallow Non-Diagenetic Natural Gas Hydrate in Deep Water Area [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29 (4): 1 – 8.
- [39] 赵金洲, 周守为, 张烈辉, 等. 世界首个海洋天然气水合物固态流化开采大型物理模拟实验系统[J]. *天然气工业*, 2017, 37(9): 15 – 22.  
Zhao Jinzhou, Zhou Shouwei, Zhang Liehui, et al. The First Global Physical Simulation Experimental Systems for the Exploitation of Marine Natural Gas Hydrates Through Solid Fluidization [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37 (9): 15 – 22.
- [40] Sasaki K, Ono S, Sugai Y, et al. Gas Hydrate: Gas Production from Methane Hydrate Sediment Layer by Thermal Stimulation with Hot Water Injection [C] //Paper OTC – 20592 – MS was Presented at the Offshore Technology Conference, 3 – 6 May, 2010, Houston, Texas, USA. Houston: OTC, 2010.
- [41] Sasaki K, Yamakawa T, Sugai Y. Integrated Thermal Gas Production from Methane Hydrate Formation [C] // Proceedings of the SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition, 25 – 27 February, 2014, Vienna, Austria. New York: SPE, 2014.
- [42] Komai T, Sakamoto Y, Kishita A, et al. Numerical Simulation of Gas Hydrate Bearing Sediments for Enhanced Recovery Using Partial Oxidation Method [C] //Proceedings of the Eleventh Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium, 21 – 27 June, 2015, Kona, Hawaii, USA. Cupertino: ISOPE, 2015.
- [43] Minagawa H, Ito T, Kimura S, et al. Depressurization and Electrical Heating of Hydrate Sediment for Gas Production [C] //Proceedings of the Eleventh Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium, 21 – 27 June, 2015, Kona, Hawaii, USA. Cupertino: ISOPE, 2015.
- [44] Gupta A, Aggarwal A. Gas Hydrates Extraction by Swapping-Depressurization Method [C] //Proceedings of the Offshore Technology Conference-Asia, 25 – 28 March, 2014, Kuala Lumpur, Malaysia. Houston: OTC, 2014.
- [45] 张旭辉, 鲁晓兵, 李鹏. 天然气水合物开采方法的研究综述[J]. *中国科学:物理学、力学、天文学*, 2019, 49(3): 34 – 55.  
Zhang Xuhui, Lu Xiaobing, Li Peng. A Comprehensive Review in Natural Gas Hydrate Recovery Methods [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2019, 49 (3): 34 – 55.
- [46] Yamamoto K, Dallimore S. Aurora-Jogmec-NRCan Mallik 2006 – 2008 Gas Hydrate Research Project Progress [J]. *Fire Ice, Methane Hydrates Newsletter*, 2008, 8 (3): 1 – 5.
- [47] Hunter R B, Collett T S, Boswell R, et al. Mont Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope: Overview of Scientific and Technical Program [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28 (2): 295 – 310.
- [48] Yamamoto K. Japan Completes First Offshore Methane Hydrate Production Test-Methane Successfully Produced from Deepwater Hydrate Layers [J]. *Fire Ice, Methane Hydrate Newsletter*, 2013, 13 (2): 1 – 2.
- [49] 王平康, 祝有海, 卢振权, 等. 青海祁连山冻土区天然气水合物研究进展综述[J]. *中国科学:物理学、力学、天文学*, 2019, 49(3): 76 – 95.  
Wang Pingkang, Zhu Youhai, Lu Zhenquan, et al. Research Progress of Gas Hydrates in the Qilian Mountain Permafrost, Qinghai, Northwest China: Review [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2019, 49 (3): 76 – 95.
- [50] 吴时国, 王吉亮. 南海神狐海域天然气水合物试采成功后的思考[J]. *科学通报*, 2018, 63(1): 2 – 8.  
Wu Shiguo, Wang Jiliang. On the China's Successful Gas Production Test from Marine Gas Hydrate Reservoirs [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63 (1): 2 – 8.