

## 深海水合物智能开采

鲁晓兵<sup>1,2</sup> 张旭辉<sup>1,2</sup> 李鹏<sup>3</sup> 鲁力<sup>1,2</sup> 王淑云<sup>1</sup>

(1 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

(2 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

(3 中国矿业大学(北京), 理学院, 100083)

天然气水合物(简称水合物)是重要的潜在能源资源,同时其开采又存在地层和结构安全及环境问题,故寻找安全高效的开采方法非常重要。我国南海发现的水合物藏埋深浅、胶结性差。现有的开采方法效率低、成本高。故需要考虑新型的高效安全开采方式。本文提出水合物智能开采方法,基本思路是:通过智能机械系统实现现场实时探测、优化开采方案、挖掘粉碎、水气土分离、回填、输运一体化运行,可以极大提高开发效率,提高安全行,节省成本。

**关键词:** 水合物, 智能开采, 传热, 地层稳定

### Intelligent Exploitation of Gas Hydrate in Deep Sea

Lu Xiaobing<sup>1,2</sup> Zhang Xuhui<sup>1,2</sup> Li Peng<sup>1,2</sup> Lu Li<sup>1,3</sup> Wang Shuyun<sup>1</sup>

(1 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, China, 100190)

(2 Department of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, China 100049)

(3 School of Science, China University of Mining & Technology, China, 100083)

Natural gas hydrate (GH) is a kind of important potential energy resource. Meanwhile, there exists a series of problems on the safety of stratum and structure and environment during GH exploitation. Most GH including the South China Sea is buried in shallow sediment and the cementing degree is poor. The current methods for GH exploitation are low efficiency and high cost. Thus high efficient and safe method of exploitation is required. An intelligent method for GH exploitation is presented. The basic idea is that the integrated operation is achieved by an intelligent machine system which can survey, optimize exploitation plan in real time, mining and smash, water-gas-soil/rock separation, backfill and transport safely, orderly, high efficiently and economically.

**Keywords:** Gas hydrate, intelligent exploitation, stability of stratum.

水合物是由甲烷等烃类气体分子和水分子组成的固体笼型化合物,与岩土体

结合形成水合物沉积物。水合物沉积物广泛分布于海底、陆地冻土区和深水湖泊。美国、日本、中国等已分别进行了水合物试采，并制定了商业开采计划<sup>[1][2]</sup>。

目前提出了注热、降压、置换和固体开采等几种水合物开采方法<sup>[3-5]</sup>。其中注热和降压联合法是目前认为最有效开采方法。在加拿大Mallik冻土区，研究人员分别于2002年和2007年通过注热和降压-注热联合方式进行了试采<sup>[6]</sup>；在美国Alaska冻土区，于2012年采用注入二氧化碳和降压联合方式进行了试采<sup>[7]</sup>；在日本海槽，于2013年通过降压方式进行了海底水合物的试采<sup>[8]</sup>。我国于2017年4-5月在南海进行了试采。这些试采证实可以通过温度和压力的扰动将水合物采出，但开采效率难以满足商业开采的需求。

无论那种开采方法，均包括热传导、相变、渗流及应力变化等几个效应，其中热传导过程最慢，而水合物分解必须有足够的热量，这是水合物开采效率不高的最主要原因<sup>[9-10]</sup>。

我国于2007年、2009年和2013年分别在南海北部陆坡神狐区、祁连山冻土区和东沙海域钻取到水合物沉积物样品<sup>[11,12]</sup>。我国冻土带水合物成藏的特点在于水合物多存在于岩石裂隙中，岩石基质的渗透率较差。我国南海水合物藏有如下特点：（1）埋深浅：我国2007年获得水合物样品的地点埋深在199~299米；2013年获得样品地点埋深13~199米，水合物层厚度为10-25m，水合物以分散状、块状、脉状等多种形式赋存于沉积物孔隙中；（2）胶结性差：均位于海底浅层为成岩的粘土中，一旦水合物分解，土体骨架就完全散开；（3）水合物饱和度约为26-48%，含甲烷气量为99%，地层坡度为3-15°。

常规开采方法目前还不适合我国南海和青藏高原冻土区的水合物商业化开采的需求，需要考虑新型的高效安全开采方式。水合物在地层中的分布一般来说很不均匀，地层的地质、物理和力学性质的空间变化多样，随着开采的进行，这些性质也会发生变化。因此，开采方案需要根据实时变化的数据进行优化。鉴于目前世界上信息技术、人工智能技术、矿产开采技术正突飞猛进地发展，深海水合物开采完全可以利用这些新型技术来高效安全可靠且经济地实现。基于此，本文提出水合物智能开采方法，下面对这个方法做简要介绍。

# 1 水合物智能开采方法

## 1.1 智能开采方法基本流程

水合物智能开采方法的基本思路是以智能机械为主体的无人采掘-粉碎-分解-分离-气体输运系统实现智能开采(图 1), 可极大提高开采效率和安全性。

基本流程为:

### (1) 智能机械在海床下水合物层的探测分析

智能机械应具有多方位感知能力, 自动根据开挖数据和钻孔、及其他探测数据分析并生成储层及上下层的地层模型(包括地层层厚、倾角、断层、孔隙裂隙、密度等)、储层参数(水合物饱和度、赋存方式、温度、强度、刚度等), 以确定采掘方式、调控机械工作参数、挖掘范围、工作机械的数量等。

### (2) 智能机械挖掘及输运

智能机械根据开采前探测的地层和环境数据及确定的方案, 结合开采过程中实时测量的数据, 确定优化的路径和方式挖掘水合物层, 粉碎成一定尺度的小颗粒; 然后通过管道将小颗粒输送到分解仓。需要实时根据颗粒尺度、水合物赋存方式(填充或胶结)、管道内温度等参数确定管道内输送压力、颗粒浓度等。挖掘系统能实现在工作范围内多台协同控制, 挖掘、粉碎和输运过程协调运行。

### (3) 水合物分解

将送入分解仓的水合物小颗粒与一定温度的海水混合, 搅拌分解。其中的关键是控制分解速率, 既要保证连续出气使开采具有商业价值, 又要保证分解后的流动稳定而不会导致管道等设备的破坏。因此需要实时地根据颗粒大小和水温, 控制搅拌速率、进水量等参数。

### (4) 分解气和水土的分离

水合物分解成水和气后, 分解仓内存在岩土颗粒、水、气体。我们关心的是气体的收集, 如果将岩土介质与气体一起提升到海上, 将需要很大的能耗。如果将岩土和水充填到采空区, 则既增加地层稳定性, 又能减少大量能耗。因此将气体与水土分解是重要的一环。这一部分的关键是三相密度相差较大且要在有限的距离内分离。这一部分需要根据分解的气体量, 以及水和岩土的比例, 实时控制管道内流体流速和颗粒浓度等参数, 第一步将岩土和部分水分离出去, 第二步将水完全分离出去。

### (5) 水土充填采空区

对分离后的土水进行加工后，比如压密，然后送回到采空区回填，以利于控制地层沉陷和滑移，实现安全开采，同时也节省了提升费用和污水处理费用。这一部分将实时测量分离出来的岩土类型、初始密度、含水量等参数，控制压密参数，并输送到预定的填埋区。

### (6) 分解气体采集与输送

将分离出来的气体通过管道输送到海上，这个过程与一般油气开采管道输送一样，主要的是需要实时地控制流量以保证流动稳定性。

### (7) 远程遥控系统

该系统能实时监测工作面上系统运行状况，必要是给予干预。这样就要求工作面上每台设备能实现智能互联，并且信息能实时远程传输、分析及反馈。

可以看到，这种开采方式既可以原地完成气体分离和水土回填，又可以控制分解速率，同时对地层安全性也有利，可以极大提高开发效率，提高安全行，节省成本。

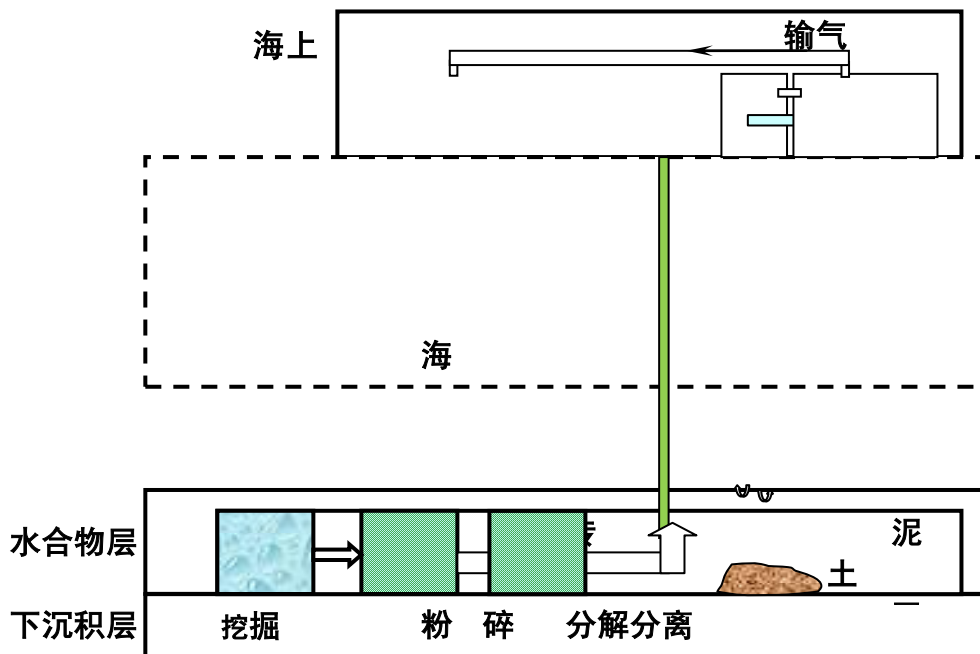


图 1 智能开采流程图

Fig.1 Sketch of mechanical-thermal combining hydrate exploitation

### 1.3 需要解决的关键科学问题

#### (1) 海床下水合物层探测及分析

在深水下地层中采用何种技术方法实时探测储层的物理和力学特性，是目前人们仍然在研究的课题。一般来说，需要声、光、电集成探测技术，不仅探测设备的设计和制造难，而且对探测数据的实时准确分析更难。

#### (1) 小颗粒水合物在流动中的分解速率

目前描述水合物分解的模型大多如 Kim 模型对小颗粒水合物分解已不适用，需要建立考虑对流传热、气泡等因素的水合物沉积物颗粒分解动力学。这个问题弄清楚后，我们才能优化设计颗粒粉碎的尺度大小，搅拌速率等参数，从而实现高效完全的在分解仓中分解水合物。

#### (2) 土-水-气多组分混合物的运动

在沉积物颗粒和海水沿管道流动过程中，压力和温度不断变化，沉积物颗粒与海水之间会发生热传导与对流传热，水合物分解相变，管道中进而从固液两相流转变为气液固三相流。对流动过程中的稳定性、压力分布、组分变化等参数变化规律需要弄清楚，从而在实际工程中能有效控制。

#### (2) 土-水-气多组分混合物的分离及回填问题

由于岩土颗粒尺度分布可能较宽，同时有水和气体的三相分离就较困难。需要采用多级分离才能实现完全的分离，但同时要在有限距离内完成，其中还需要实时的各组分的测量，这就需要克服许多困难。

#### (3) 开采时的地层稳定性问题

我国南海水合物藏所在海床具有两个主要特点：(1) 海床有一定的坡度（一般是 3-15°）；(2) 地层较软，即强度和刚度小，易发生破坏和变形。如何最大程度地将水合物挖掘出来，并同时保持地层的稳定是开采的关键环节之一。除了及时将分离出的水土回填，还需要实时监测地层变形动态，根据地层特点优化开采路线和区域，并根据实时监测数据，随时做好防范措施。

## 结论

针对目前已有水合物开采方法效率低、成本高的缺陷，提出了水合物智能开采方法的基本思路。对这个思路的主要步骤及其中的关键问题进行了阐述。分析

表明,这种开采方法是非常具有应用前景的一种方法,值得开展深入的研究。但是需要解决地下自动探测、水合物颗粒可控分解、三相分离、地层稳定性控制、系统远程遥控等多个难题。

### 参考文献

- 1 Lee S, Kim S. Onshore and Offshore Gas Hydrate Production Tests. *Economic and Environmental Geology*, 2014, 47(3), 275-289
- 2 王少勇. “可燃冰”, 一把终将燃起的火焰-国务院参事张洪涛谈天然气水合物开发利用前景. *中国国土资源报*, 第001版, 2014
- 3 Stevens JC, Howard JJ, Baldwin BA. Experimental hydrate formation and gas production scenarios based on CO<sub>2</sub> sequestration. In *Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates*, Vancouver, Canada, July 6-10, 2008
- 4 Silva JMD, Dawe R. Towards commercial gas production from hydrate deposits. *Energies*, 2011, 4: 215-238
- 5 张旭辉, 鲁晓兵, 刘乐乐. 天然气水合物开采方法研究进展. *地球物理学进展*, 2014, 29(2): 858-869
- 6 Uchida S, Soga K, Klar A, Yamamoto K. Geomechanical study of the Mallik gas hydrate production field trials. In *Scientific results from the JOGMEC/NRCan/Aurora Mallik 2007-2008 Gas Hydrate Production Research Well Program*, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada, 2012
- 7 Hauge L P, Birkedal K A, Ersland G, Graue A. Methane production from natural gas hydrates by CO<sub>2</sub> replacement-Review of lab experiments and field trial. *SPE*, 169198, 2014
- 8 Lee S, Kim S. Onshore and Offshore Gas Hydrate Production Tests. *Economic and Environmental Geology*, 2014, 47(3), 275-289
- 9 Zhang XH, Lu XB, Zheng ZM, et al. Heat-induced evolution of phase transformations in tetrahydrofuran hydrate-bearing sediment. *Journal of Heat transfer-Transaction of the ASME*, 2014, 136: 052002
- 10 Kamath VA, Holder GD, Angert PF. Three phase interfacial heat transfer during the dissociation of propane hydrates. *Chemical Engineering Science*, 1984, 39(10): 1435-1442

- 11 Sha ZB, Liang JQ, Zhang GX, et al. A seepage gas hydrate system in northern South China Sea: Seismic and well log interpretations. *Marine Geology*, 2015, 366: 69-78
- 12 沙志彬, 梁金强, 苏丕波等. 珠江口盆地东部海域天然气水合物钻探结果及其成藏要素研究. *地学前缘*, 2015, 22(6): 125-135