

## 海底天然气水合物绞吸式开采方法研究\*

徐海良, 林良程, 吴万荣, 吴波

(中南大学机电工程学院//高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南长沙410083)

**摘要:** 根据海底天然气水合物藏特点, 结合绞吸式挖泥船工作原理和大洋多金属结核开采技术, 提出了一种全新的绞吸式海底天然气水合物开采方法, 克服了海底天然气水合物开采依赖构筑封闭开采环境的技术瓶颈; 然后根据管道输送原理和两相流理论, 对绞吸式开采方法的提升系统进行了水力参数分析。由分析结果可知, 将体积浓度为15%~25%天然气水合物流体从1 000 m海底提升到海面所需泵的扬程为30~50 m; 将体积浓度为10%~20%天然气水合物流体从4 000 m海底提升到海面所需扬程为90~150 m, 现有的矿浆泵就能满足要求; 由于天然气水合物和海底沉积物硬度较低, 并且其混合流体的密度与海水密度相差不大, 采用矿浆泵进行直接输送其对泵的磨损不会严重, 能保证系统长期稳定的工作, 证明了该开采方法在理论上是可行的。

**关键词:** 绞吸开采; 天然气水合物; 水力输送; 矿浆泵

中图分类号: P744/TD807 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2011)03-0048-05

### Cutter-suction Exploitation Mode of Marine Gas Hydrate

XU Hailiang, LIN Liangcheng, WU Wanrong, WU Bo

(School of Mechanical and Electrical Engineering // State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** According to the characteristic of submarine gas hydrates and combining the working principle of Cutter Suction Dredger and the exploitation technique of the polymetallic nodule mining in ocean, a new exploitation mode named cutter-suction marine gas hydrate was proposed and used to resolve the technology bottleneck restrict that the gas hydrates under the sea couldn't be exploited without a close exploiting environment. And then based on the pipeline transporting principle and the two-phase flow theory, the hydraulic transmission system was analyzed. The result shows that the hydraulic with volume concentration of 15% to 25% pumped upon to the sea-surface from 1 000 m depth only needs deliverylift about 30 m to 50 m, and pumped from 4 000 m with volume concentration of 10% to 20% only needs deliverylift about 90 m to 150 m which the common double channel impeller pump present having also can meet the requirements; besides the stiffness of the gas hydrate and the submarine sediment are low, and the density of their compound fluid is similar to the seawater, so the gas hydrate transported directly by slurry pump will not cause the slurry pump wearing badly which can keep the system working stably for a long time. Consequently, the cutter-suction exploitation mode of marine gas hydrate is feasible in theory.

**Key words:** cutter-suction; gas hydrate; hydraulic conveying; slurry pump

能源是维持经济持续发展的基础。目前, 随着传统能源的日益枯竭, 世界各国不得不寻找高效和清洁的替代能源。海底天然气水合物具有储量大、

能量密度高、分布广及埋藏浅等诸多优点, 已被公认为是最具前景的、最理想的清洁能源和替代能源<sup>[1-2]</sup>。海底天然气水合物的赋存形式不像冻土带

\* 收稿日期: 2010-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975290)。

作者简介: 徐海良(1965-), 男, 教授, 博士生导师; E-mail: hailiang\_xu@yahoo.com.cn

水合物具有严实的覆盖层（如封闭的岩石圈），尤其是那些品位高、易于开采的海底天然气水合物藏，它们或裸露于海底，或只有很浅的沉积物覆盖层（与露天煤矿极为相似），根据研究表明，由于海底水合物开采过程中无法构筑像“气囊”一样的封闭环境，减压开采法、热激发开采法、注入化学试剂法和  $\text{CO}_2$  置换法都无法实施<sup>[3-5]</sup>，现有的固体开采法操作相当复杂，无法达到预定的效果；混合开采法目前还没有进行深入研究，更没有具体方案。

本文根据海底天然气水合物藏赋存的地质特点和开采环境要求，针对天然气水合物开采依赖构筑像“气囊”一样封闭的开采环境的技术瓶颈，结合深海采矿技术和绞吸式挖泥船技术，提出了一种全新的绞吸式开采方法，并对其水力提升系统进行了理论分析论证了绞吸式开采方法理论上可行，为海底天然气开采提供技术储备。

## 1 绞吸式海底天然气水合物开采方法

本文研究的绞吸式海底天然气水合物开采方法如图1所示，它由海底采掘车、水力提升系统和海面分解集运系统三个部分组成。水力提升系统包括软管、硬管和提升泵，海面分解集运系统包括由分解池、集气、水泵和尾矿管组成的分解平台和运输船组成的运输系统。

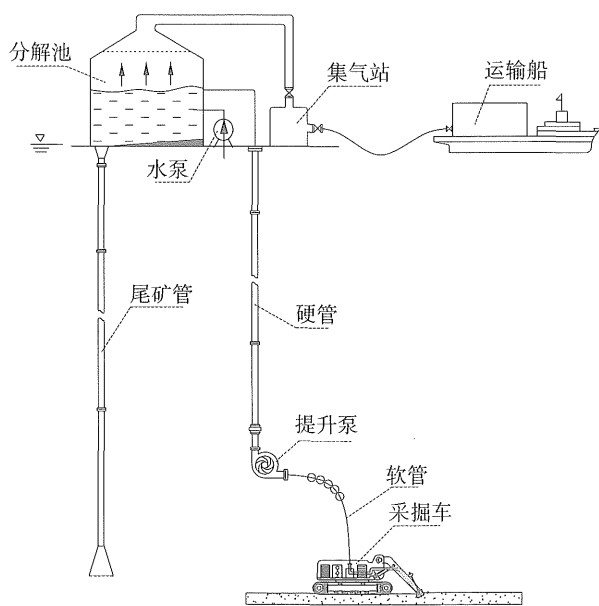


图1 绞吸式海底天然气水合物开采方案

Fig. 1 Cutter-suction exploitation mode of marine gas hydrate

绞吸式天然气水合物开采方法的工作原理：如图2所示，首先采掘车上的螺旋切绞刀对水合物进行切割和破碎，与此同时破碎后的水合物颗粒在提升泵产生的吸力作用下被快速地吸入管道内，进入软管，再经提升泵加压之后，通过硬管直接输送至海面的分解池内；同时分解池旁的水泵将海面海水（约  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）不断地注入分解池内提高分解池水温，由于天然气水合物输送至分解池内时压力得到降低，温度得到提高，因而迅速分解；分解出来的天然气经干燥后收集于集气站并通过软管输往运输船，而尾矿则通过尾矿管排至海底，以防污染海洋。由于采掘车在海底切割和收集水合物的过程中没有打破其热力学平衡与压力平衡<sup>[6-8]</sup>，因此在理论上不会造成天然气水合物的分解。

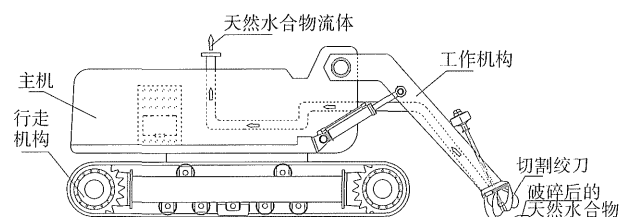


图2 海底采掘车简图

Fig. 2 Sketch of ocean mining vehicle

由于绞吸式开采方法采用管道直接将采矿车开采的海底天然气水合物颗粒直接输送至海面上再进行分解、干燥和液化等后续处理，开采过程中无需构筑封闭的环境，具有开采操作简单，持续性强，工作效率高等优点，适合于开采缺乏致密覆盖层的海底天然气水合物藏。

## 2 水力提升系统参数分析

水合物通过管道从海底向分解池的输送过程中，其环境压力逐渐降低，根据天然气水合物的物理性质可知，小部分水合物将会分解，因此水合物的输送是一种固、液、气三相流输送。目前，固、液、气三相流输送理论尚不成熟，研究成果比较缺乏；但已有大量实验证明浆体在管道输送过程中加入适当量气体后有利于减低管道阻力<sup>[9-10]</sup>；此外，气体的存在可以降低管道内流体的平均密度，对提升泵扬程要求也随之降低。因此，本文将系统简化为固液两相流模型进行理论研究，对水合物提升系统的参数分析是合理可行的。

### 2.1 水力提升泵的扬程分析

固液两相输送管道内的流动相当复杂，为了准

确描述固液混合物在管道内运动所具有的特点, 根据流体特性作如下假设<sup>[11]</sup>:

- 1) 管道内的流动为定常的、不可压缩的;
- 2) 固液两相均为连续流体, 且每相的物理特性均为常数;
- 3) 不考虑相变。

根据流体运动过程中的能量守恒可以得到输送管道内固液两相流动的伯努利方程<sup>[12]</sup>:

$$\frac{P_1}{\rho_m g} + \frac{\alpha_{m1} u_{m1}^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho_m g} + \frac{\alpha_{m2} u_{m2}^2}{2g} + Z_2 + \Delta h_m \quad (1)$$

式中:  $\rho_m$  为输送管内浆体的密度;  $u_{m1}$ 、 $u_{m2}$  为浆体在提升管截面 1 和截面 2 的流速;  $\alpha_{m1}$ 、 $\alpha_{m2}$  为输送管截面 1 和截面 2 对应的动能修正系数;  $\Delta h_m$  为浆体从截面 1 到截面 2 的能量损失;  $P_1$ 、 $P_2$  为输送管截面 1 和截面 2 对应的静压;  $Z_1$ 、 $Z_2$  为管道截面 1 和截面 2 对应的高度。

上式中动能修正系数是考虑到固液两相速度不相等而对动能项进行的修正; 然而, 当系统中动能项占总能量的比例很小时, 动能修正系数可以取 1, 即  $\alpha_m = 1$ 。

在海底天然气水合物水力提升系统中, 流体速度较小, 流体的势能和压能占绝大部分, 动能所占比例非常小, 因此, 取  $\alpha_{m1} = \alpha_{m2} = 1$ , 则式 (1) 转化为

$$\frac{P_1}{\rho_m g} + \frac{u_{m1}^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho_m g} + \frac{u_{m2}^2}{2g} + Z_2 + \Delta h_m \quad (2)$$

上式实际上是均质流的伯努利方程, 也适用于分析本文的水力提升系统内浆体的运动。

图 3 是水合物通过管道从海底向分解池的输送的简化模型, 根据图 3 可以知道, 在水力提升系统中, 流体输送所需要的压力完全由提升泵提供, 只有当泵的扬程大于临界深度时, 才可能将天然气水合物颗粒提升至海面; 现利用式 (2) 对提升系统进行水力分析, 以确定相关参数的计算方法。

分析前假定固液两相均匀混合, 各相物理特性为常数。根据管道中固液两相的伯努利方程, 浆体从海底 (图 2 中 A 点) 至海面 (B 点) 需要提供的扬程为

$$H = \frac{P_c}{\rho_w g} + \frac{\rho_m h}{\rho_w} - \frac{\rho_l h}{\rho_w} + \frac{\rho_m u_m^2}{2\rho_w g} + \frac{\Delta P_m}{\rho_w g} \quad (3)$$

式中:  $H$  为水泵扬程,  $\rho_l$  为海水密度,  $\rho_w$  为水的密度,  $\rho_m$  为浆体密度,  $h$  为工作水深,  $u_m$  为管道出口浆体流速,  $P_c$  为管道出口压力,  $\Delta P_m$  为压力损失。

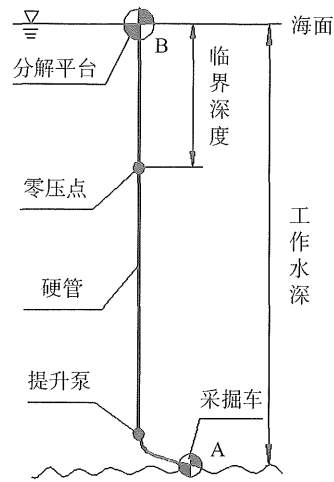


图 3 水合物水力输送简化模型

Fig. 3 Simplified model of the hydraulic transportation system

## 2.2 提升系统的参数分析

提升系统的基本参数包括体积流量  $Q_v$ 、固相的体积浓度  $C_v$ 、管道内径  $D_n$ 、输送高度等。其中提升系统的体积流量  $Q_v$  可表示为

$$Q_v = Q_g / C_v \quad (4)$$

天然气水合物颗粒的体积流量  $Q_g$  为

$$Q_g = Q_{vq} / (S\phi\varphi) \quad (5)$$

式中:  $Q_{vq}$  为系统的天然气产量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ );  $S$  为产气因子;  $\phi$  为饱和度;  $\varphi$  为孔隙度。

浆体密度  $\rho_m$  为

$$\rho_m = C_v \rho_g + (1 - C_v) \rho_l \quad (6)$$

其中,  $\rho_g$  是湿颗粒的密度, 该颗粒为天然气水合物与海底沉积物的混合物, 其计算公式为

$$\rho_g = \rho_c (1 - \phi\varphi) + \rho_l \phi\varphi \quad (7)$$

式中:  $\phi\varphi$  为颗粒中天然气水合物的体积比例;  $\rho_c$  为海底浅层沉积物的密度;  $\rho_l$  为天然气水合物的密度。

2.2.1 输送管道的参数分析 根据系统的作业水深, 确定输送管道的长度  $l$ 。根据系统的体积流量  $Q_v$  和浆体流速  $u_m$ , 输送管道的内径:

$$D_n = \left( \frac{4Q_v}{\pi u_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

为保证提升系统有效的、安全的工作, 对于竖直管, 流体的流速大于颗粒的沉降速度  $u_l$  即可<sup>[13-14]</sup>, 沉降速度的计算公式见式 (9); 对于软管, 流体的流速即要大于颗粒的沉降速度  $u_l$  又要大于其临界流速  $u_k$ , 临界流速的计算公式见式 (10)。

$$u_l = (0.67 \sim 0.82) \sqrt{\frac{8d_{50}g(\rho_g - \rho_l)}{3\rho_l}} \quad (9)$$

式中： $d_{50}$  为颗粒中值粒径。

$$u_k = F_l \left[ 2gD_n \left( \frac{\rho_g - \rho_l}{\rho_l} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中： $F_l$  为与颗粒浓度和直径相关的经验系数，当颗粒直径大于 1 mm 时，取 1.34。

2.2.2 提升泵的参数分析 提升泵是提升系统最核心的设备，设计出合理的提升泵是保证提升系统正常工作的前提。提升泵的主要参数有扬程  $H$ 、流量  $Q$  及功率  $N$ ，提升泵的流量应等于提升系统的体积流量  $Q_v$ ，即  $Q = Q_v$ ，提升泵的扬程已根据式 (3) 确定。在式 (3) 中，压力损失  $\Delta P$  则可按下列公式计算<sup>[15]</sup>：

$$dP_m = \left[ (1 - C_v) \rho_l \lambda_l \frac{u_l}{2D_i} + C_v \rho_g \lambda_g \frac{u_g^2}{2D_n} \right] ds \quad (11)$$

式中： $ds$  为管道的微分长度； $dP_m$  为压力损失的微分；

$\lambda_l$ 、 $\lambda_g$  分别是管道对海水和颗粒的阻力系数，它们的计算公式如下：

$$\lambda_l = \frac{1}{[1.74 + 21g(D_n/2\Delta)]^2} \quad (12)$$

$$\frac{\lambda_g}{\lambda_l} = 48.9 \left( \frac{d_{50}}{D_n} \right)^{2.1} \left( \frac{u_l}{gD_n} \right)^{-1.6} \left( \frac{m'_g}{m'_l} \right)^{0.7} \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{2.0} \quad (13)$$

式中： $\Delta$  为管道内壁粗糙度； $m'_g$  为矿石的重量流速， $m'_g = Q_g \rho_g$ ； $m'_l$  为海水的重量流速， $m'_l = Q_l \rho_l$ 。

根据泵的扬程  $H$  和流量  $Q$ ，可以求得泵的轴功率  $N$ ，它们的计算公式为

$$N = HQ\rho_w g / 1\,000 \eta_b \quad (14)$$

式中： $\eta_b$  为提升泵的效率， $N$  的单位为 kW。

### 2.3 计算与结果分析

水合物藏一般都位于水深 4 000 m 以内的海底，但水深 1 000 m 内的水合物藏具有开采相对容易、商业前景较好及勘探资料丰富等优点，最具开采价值<sup>[15-16]</sup>。本文取工作深度为 1 000 m 和 4 000 m 两种工况的水力系统进行分析，参考大洋多金属结核开采方案，确定体积流量  $Q_v = 420 \text{ m}^3/\text{h}$ ，海水密度  $\rho_l = 1\,040 \text{ kg/m}^3$ ，提升泵效率  $\eta_b = 70\%$ 。

根据天然气水合物性质，确定其密度  $\rho_l = 930 \text{ kg/m}^3$ ，天然气水合物比例  $\phi\varphi$  为 50%，颗粒中值粒径  $d_{50} = 10 \text{ mm}$ ，产气因子  $S = 164$ ，海底浅层沉积物密度  $\rho_c = 1\,450 \text{ kg/m}^3$ 。

在如表 1 所示的 5 种工况的情况下，对提升系统进行参数分析，得到输送系统参数的计算结果如表 2 所示。

表 1 5 种水合物输送工况

Table 1 Five kind working condition of the gas hydrate transportation

参数	单位	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
天然气产量 $Q_w$	$\text{m}^3/\text{h}$	5 166	8 610	8 610	3 444	6 888
工作深度 $h$	m	1 000	1 000	1 000	4 000	4 000
体积浓度 $C_v$	%	15	25	25	10	20
浆体流速 $u_m$	m/s	1.651	1.651	2.378	1.651	1.651
管道内径 $D_n$	mm	300	300	250	300	300

表 2 5 种工况下的输送系统参数

Table 2 Calculative result of the transportation system parameter

参数	单位	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
浆体密度 $\rho_m$	$\text{kg/m}^3$	1 062.5	1 077.5	1 077.5	1 055	1 070
沉降速度 $u_l$	m/s	0.159	0.159	0.159	0.159	0.159
临界流速 $u_k$	m/s	1.234	1.234	1.126	1.234	1.234
管道粗糙度 $\Delta$	mm	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
水阻系数 $\lambda_l$		0.015 2	0.015 2	0.015 9	0.015 2	0.015 2
矿阻系数 $\lambda_g$		0.000 7	0.001 1	0.000 6	0.000 5	0.000 9
阻力损失 $\Delta P_m$	Pa	64 692	58 116	149 397	259 600	233 702
水力损失 $\Delta h$	m	6.61	5.93	15.24	26.54	23.90
系统势能	m	22.50	37.50	37.50	60.12	120.24
系统动能	m	0.149	0.150	0.311	0.148	0.149
提升泵扬程 $H$	m	29.249	43.580	53.051	86.808	144.289
提升泵功率 $N$	kW	47.77	71.18	86.65	141.50	235.22
输送效率 $\eta$	%	54.20	59.90	49.90	69.29	83.33

由表2可知,当产能达 $6\ 888\ \text{m}^3/\text{h}$ (每天工作20 h,相当于 $137\ 760\ \text{m}^3/\text{d}$ )时,将天然气水合物颗粒从海底4 000 m提升至海面,提升泵的扬程只需145 m,功率236 kW,现有的工业技术完全可以达到。而将天然气水合物从1 000 m深的海底提升至海面,提升泵的扬程只需50 m左右,功率80 kW左右,现有的矿浆泵均能满足要求。

同时,天然气水合物的硬度较低,其密度为 $930\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,其物理性能与冰相似;海底浅层沉积物的颗粒很小,密度为 $1\ 450\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,天然气水合物、海底浅层沉积物及海水的混合流体的密度只有 $1\ 077\ \text{kg}/\text{m}^3$ 左右,与海水密度 $1\ 040\ \text{kg}/\text{m}^3$ 相差不大;因此,采用矿浆直接进行输送,混合流体与矿浆泵的过流部件磨损不会严重,可保障提升系统长期稳定工作。

### 3 结 论

1) 根据海底天然气水合物的赋存特点,结合绞吸式挖泥船工作原理和深海采矿技术,提出了一种全新的绞吸式天然水合开采方法,该方法利用采掘车采掘水合物颗粒,由提升泵将水合物颗粒直接输送至海面再进行分解和收集,无需依赖构筑像“气囊”一样封闭的开采环境,对无覆盖层的海底天然气水合物藏的开采具有重要的指导意义。

2) 将天然气水合物颗粒从海底4 000 m提升至海面,提升泵的扬程只需145 m,功率236 kW;而将天然气水合物从1 000 m深的海底提升至海面,提升泵的扬程只需50 m左右,功率80 kW左右,采用矿浆泵进行输送可以满足系统要求。

3) 天然气水合物、海底浅层沉积物及海水的混合流体的密度与海水密度相差不大,且天然气水合物和海底浅层沉积物的硬度较低,因此,采用矿浆直接进行输送磨损不会严重,可保障提升系统长期稳定工作,在理论上证明了该方法适合于海底天然水合物的开采。

#### 参考文献:

[1] LEE S Y, HOLDER G D. Methane hydrates potential as a future energy source[J]. *Fuel Processing Technology*, 2001 (71): 181 - 186.  
 [2] MILKOV A V, SASSEN R. Preliminary assessment of resources and economic potential of individual gas hydrate accumulations in the Gulf of M Mexico continental slope

[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20: 111 - 128.  
 [3] OHGAKI K, TAKANO K, SANGAWA T H. Methane exploitation by carbon dioxide from gas hydrates: Phase equilibria for  $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$  mixed hydrate system[J]. *J. Chem. Eng. Japan*, 1996, 29(3): 478 - 483.  
 [4] WONMO S, HOSEOB L, SUNIOONK. Experimental investigation of production behaviors of methane hydrate saturated in porous rock[J]. *Energy Sources*, 2003 (25): 845 - 856.  
 [5] TARO K, MICHKA O, YASUHID S. Experimental study of enhanced gas recovery from gas hydrate bearing sediments by inhibitor and steam injection method[C]// *Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates*. Vancouver, British Columbia, CANADA: 2008.  
 [6] YUUDIF M. H., SLOAN E. D. Experimental investigation of hydrate formation and dissociation in consolidated porous media [C]. *SPE 20172*, 1991.  
 [7] LU H, KAWASAKI T, ZENG H. Sediment control on the saturation level of gas hydrate in natural environments [C]// *ICGH 6*, Vancouver, 2008.  
 [8] 卢振权, SULTAN N, 金春爽. 天然气水合物形成条件与含量影响因素的半定量分析[J]. *地球物理学报*, 2008, 1(51): 125 - 130.  
 [9] 李文华. 空气助送泥技术的研究与应用[J]. *中国水运*, 2002(2): 354 - 359.  
 [10] 郑永刚, 方铎. 圆管流掺气减阻理论研究[J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 1996(2): 238 - 243.  
 [11] SLOAN E. D. Natural gas hydrates[J]. *Journal Petroleum Technology*, 1991, 43(12): 1414 - 1417.  
 [12] 佟庆理. 两相流动理论基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982.  
 [13] KOSTUIK S P. Hydraulic hoisting and the pilot-plant investigation of the pipeline transport of crushed magnetite [C]// *The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, 1996.  
 [14] G W 格威尔, K 阿济兹. 复杂混合物在管道中的流动 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1983: 142 - 146.  
 [15] KVENVOLDEN K A. Gas hydrate-geological perspective and global change [J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31: 173 - 187.  
 [16] GOMITZ V, FUNG I. Potential distribution of methane hydrates in the world's oceans [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8: 335 - 347.