

一种新的海洋浅层水合物开采法

——机械-热联合法¹⁾

张旭辉²⁾ 鲁晓兵

(中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

摘要 天然气水合物是国家的战略能源之一. 天然气水合物分解相变使其开采难度高于常规化石能源. 国际天然气水合物试验性开采表明通过降压、注热等方法难以满足商业化开采的需求, 尤其在水合物位于浅层、软土情况下, 持续稳定且高效率的热量供给是其瓶颈. 天然气水合物机械-热联合开采是一种新概念模式, 即通过粉碎水合物沉积物通过管道输运并在内部分解, 这样既增加了传热的表面积, 又利用海水热量和对流传热提高了能量供给效率. 分析表明: 利用该方法开采时水温过高会导致水合物分解过快而产生不稳定流, 温度过低又导致水合物二次生成或结冰; 水流流速既要能使被粉碎的水合物沉积物颗粒悬浮和流动, 又不能导致流动失稳. 为了实现高效安全的机械-热水合物开采, 经过初步分析提出原位水合物地层粉碎的颗粒直径设定在 0.1~1.0 cm 之间, 控制水流速度为 0.22~0.67 m/s, 温差保证在 5 K 以上, 混合物中水的体积分数大于 0.85.

关键词 机械-热联合开采, 天然气水合物, 对流传热, 海水热量

中图分类号: O359 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-15-112

A NEW EXPLOITATION METHOD FOR GAS HYDRATE IN SHALLOW STRATUM: MECHANICAL-THERMAL METHOD¹⁾

Zhang Xuhui²⁾ Lu Xiaobing

(Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems Chinese Academy of Science, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Gas hydrate is one of the national strategic energy resource. The endothermic chemical dissociation and phase transformations make its exploitation differ from those of the fossil energies. A continuous, stable, and high efficient heat supply is the critical problem to commercial production of gas hydrate. The combined mechanical-thermal gas hydrate exploitation is a new conceptual method, crushing gas hydrate-bearing sediments into small bodies to increase the surface area of heat transfer, and utilizing the heat of seawater and convective heat transfer to enhance the efficiency of energy supply. Through the feasibility analysis, the results show that relative high temperature leads to the rapid dissociation of gas hydrate, and the fluid flow becomes unstable, while low temperature leads to the reformation of gas hydrate or freezing. In order to achieve efficient and safe exploitation of gas hydrate, the diameter of crushing bodies of in-situ mining hydrate-bearing sediments ranges from 0.1 cm to 1.0 cm, the seawater injection velocity ranges from 0.22 m/s to 0.67 m/s, the temperature difference is greater than 5 K, and the volume fraction of water in the mixed water and grains

2015-04-03 收稿, 2016-05-31 录用, 2016-07-25 网络版发表.

1) 国家自然科学基金 (51239010, 41376078, 11272314) 和中石油 — 中科院高端战略联盟计划 (2015A-4813) 资助项目.

2) 张旭辉, 副研究员, 主要方向: 天然气水合物, 岩土力学和渗流力学. E-mail: zhangxuhui@imech.ac.cn

引用格式: 张旭辉, 鲁晓兵. 一种新的海洋浅层水合物开采法 —— 机械-热联合法. 力学学报, 2016, 48(5): 1238-1246

Zhang Xuhui, Lu Xiaobing. A new exploitation method for gas hydrate in shallow stratum: mechanical-thermal method. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(5): 1238-1246

of hydrate sediments exceeds 0.85. The combined mechanical-thermal hydrate exploitation is a new potential technology for efficient production of gas hydrate stratums.

Key words combined mechanical-thermal exploitation, gas hydrate, convective heat transfer, seawater energy

引言

天然气水合物是一种由甲烷等烃类气体分子和水分子组成的固体笼型化合物,与砂土、黏土等沉积物骨架胶结或填充在孔隙中形成水合物沉积物.天然气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、日本等国家已分别在冻土区和海底进行了天然气水合物的试验性开采,并制定了商业开采计划^[1],我国在南海北部陆坡、东沙海域和祁连山冻土区分别取得了天然气水合物沉积物样品^[2],并计划在 2017 年前后进行试验性开采.

目前天然气水合物开采方法主要有注热法、降压法、置换法和固体法等^[3-9].其中,注热法和降压法的联合使用是目前认为最为有效的天然气水合物开采方法.注热法是通过向天然气水合物地层中注入热水、蒸汽等使其分解;降压法是通过降低天然气水合物储层的压力使水合物分解.麦索亚哈气田发现于 20 世纪 60 年代末,是第一个进行商业开采的气田,该气田上方发现存在天然气水合物藏,于是在气田开发的同时,采用降压法、注入抑制剂法等对天然气水合物藏进行了商业开采,但关注重点是下部油气藏开采.在加拿大 Mallik 冻土区,分别于 2002 年和 2007 年通过注热和降压-注热联合方式进行试采^[10];在美国 Alaska 冻土区,于 2012 年通过注入二氧化碳和降压联合方式进行试采^[11];在日本海槽,于 2013 年通过降压方式进行海底天然气水合物的试采^[12-13].天然气水合物试采证实这些方法可以通过温度和压力的扰动使天然气水合物分解而采出天然气,但开采效率难以满足商业化开采的需求.

现有开采天然气水合物的方法,无论是降压法还是注热法,均包括热传导、相变、渗流及应力变化等几个效应^[14-16],其对应的特征时间表达式如下:传热 $t_c = h^2/\kappa_s$ 、相变 $t_d = \rho_h/[k_d \cdot (p_e - p_g) \cdot A_s]$ 、气体渗流 $t_p = \mu \cdot h^2/(k \cdot \Delta p_g)$ 、应力传播 $t_s = h/(E_s/\rho_h)^{1/2}$.通过对这 4 个特征时间进行估算,可以得到在天然气水合物沉积物分解区域内 4 个特征时间的数量级分别为: 10^6 s, 10^4 s, 10^3 s, 10^{-3} s, 即特征时间之比为 $10^9:10^7:10^6:1$.从这 4 个物理过程的特征时间之比来看,热传导过程最慢,固体热传导传递 1 m 需要 10 d

左右,但要想通过降压、注热等方法将天然气水合物分解相变成气体,需对天然气水合物沉积物进行供热,这也是试采开采效率不高的主要原因.

近年来,中国地质调查局在我国冻土区和南海北部陆坡开展了大量的天然气水合物调查研究工作,并于 2007 年、2009 年和 2013 年分别在南海北部陆坡神狐区、青海木里祁连山冻土区和东沙海域钻取到天然气水合物沉积物样品^[2,17].木里地区天然气水合物稳定带顶端埋深 171 m,底端埋深 574 m,天然气水合物稳定带厚 403 m.我国冻土带天然气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.我国南海发现天然气水合物的地区具有如下特点:(1)埋深浅:我国 2007 年获得天然气水合物样品的地点埋深在 199~299 m,天然气水合物多以分散状赋存于沉积物孔隙中.2013 年获得样品地点埋深 13~199 m,天然气水合物层厚度为 10~25 m,天然气水合物以分散状、块状、脉状等多种形式赋存于沉积物孔隙中.(2)胶结性差:我国获得的天然气水合物样品均位于海底浅层未成岩的黏土中,一旦天然气水合物分解,土体骨架就完全散开.(3)天然气水合物饱和度为 26%~48%,含甲烷气量为 99%,地层坡度为 $3^\circ \sim 15^\circ$.

从我国天然气水合物藏及地质特点看,分散性大、地层胶结性差、天然气水合物赋存形式多样.最主要的是热量的及时供给是天然气水合物开采的前提,而我国天然气水合物地层的传热性很差,以我国南海天然气水合物地层为例,采用注热法(100°C)开采,在 20 年开采期内,天然气水合物分解界面的传播范围为 30 m,这使得常规的开采方法效率非常低、成本也非常高^[18].故常规开采方法目前还不适合我国南海和祁连山的天然气水合物开采,需要考虑新型的高效安全开采方式,而热量在天然气水合物沉积物中的快速传递这个瓶颈问题的解决是关键.

1 机械-热联合开采天然气水合物方法

1.1 新构想与基本流程

机械-热联合开采天然气水合物的方法正是在考虑到常规开采方法中传热及开采效率低下的情况

下, 结合我国天然气水合物地层的地质和力学特点的基础上提出的新设想, 是一种新的开采方法。

机械-热联合开采天然气水合物的基本思路是: 由于提高热传导效率是天然气水合物开采的关键, 要达到这个目的, 最好的办法是减小传热的尺度, 增加传热表面积. 因此提出的机械-热联合开采方法的第一步是像采煤采矿一样通过机械挖掘天然气水合物地层并将天然气水合物粉碎成小颗粒, 然后使其与海水掺混, 通过热传导和对流传热而促使天然气水合物分解。

基本流程主要为: 地下挖掘 → 粉碎 → 传送 → 混合 → 颗粒流输送 \ 分解 \ 分离 \ 回填 → 气体做功 (注海水) → 气体输送与收集 (如图 1). 即包含如下过程: (1) 用机械将天然气水合物从地层挖掘出来并粉碎成一定尺度的小颗粒送入管道; (2) 将从一定深度取得的海水注入管道内, 使海水与小颗粒混合并带其向前流动; (3) 天然气水合物在管道内随海水运动过程中分解, 在给定的温度和海水流量条件下, 通过一定的距离后天然气水合物全部分解; (4) 在海床上, 将分解产生的气体与沉积物骨架颗粒和水分离,

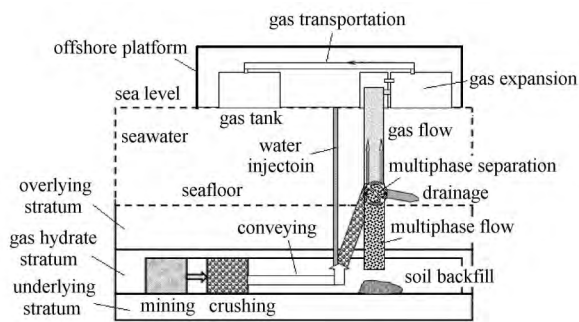


图 1 机械-热联合开采流程图

Fig. 1 Sketch of mechanical-thermal combining hydrate exploitation

离, 将沉积物骨架颗粒回填, 水排入海水中. 这种方式可以减少沉积物在管道中的水力输送, 又便于沉积物的回填, 适合浅层天然气水合物地层的开发。

1.2 可行性分析

与现有开采方法对比, 这种新的开采方法具有如下 3 个优势: (1) 常规开采方法, 如降压法、注热法等, 天然气水合物的开采效率与开采程度取决于热传导、天然气水合物分解率、地层渗流等过程, 关键是热传导. 这些过程的特征时间较长, 限制了天然气水合物分解范围的扩展, 因此效率低. 机械-热联合开采方法可以提供开采需要的任何数量的天然气水合物. 同时, 粉碎后小颗粒由于尺度小而使热传导特征时间缩短 (见表 1). 因此, 天然气水合物的开采效率和程度大大提高, 并可以根据经济性和安全性要求, 对天然气水合物沉积颗粒的供应速度、分解速度进行控制. (2) 可以充分利用海水的巨大热量, 提高开采效率. 通过管道将温度较高 (25°C) 的表层海水输送到下部天然气水合物层, 与粉碎的天然气水合物沉积物小颗粒进行掺混, 然后通过泵送的方式, 将混合物向上部提升. 一般地, 海水注入到下部水合物层时, 还有十几摄氏度的温差^[14]. (3) 降低地层安全性风险. 常规天然气水合物开采方法使得井筒周围的天然气水合物不断分解, 沉积物大范围地软化, 强度整体降低. 同时, 地层变形使气体渗透路径变窄, 地层中容易形成孔隙气体压力的聚集, 地层的稳定性风险较大且不易控制. 机械-热开采法可对地层采矿开挖方式和开挖空间预先进行合理的结构设计, 控制开挖间隔、开挖孔洞、开挖支护等, 对地层安全性可控, 也可避免天然气水合物分解的气体从覆盖层泄漏。

表 1 特征时间估算表

Table 1 Estimation of characteristic times

	Thermal production (The characteristic length : 1 m)	Mechanical - thermal production (The characteristic length : 10 mm)
heat conduction	$t_c = \frac{L^2}{\kappa} \approx 1.8 \times 10^6 \text{ s}$	$t_c = \frac{R^2}{\kappa_e} \approx 900 \text{ s}$
phase transition	$t_d = \frac{\rho_H \cdot L}{M_H \cdot k_d \cdot \Delta f \cdot A_s} \approx 2.3 \times 10^4 \text{ s}$	$t_d = \frac{\rho_H \cdot R}{M_H \cdot k_d \cdot \Delta f \cdot A_s} \approx 0.3 \text{ s}$

注: $\rho_H, L, M_H, k_d, \Delta f, A_s, \kappa$ 分别表示天然气水合物密度、特征长度、天然气水合物摩尔质量、天然气水合物分解动力学常数、压差 (化学上称为逸度差), 分解比表面积, 热扩散系数。

Note: $\rho_H, L, M_H, k_d, \Delta f, A_s$ and κ are the density of gas hydrate, characteristic length, molar mass of gas hydrate, decomposition kinetics constant of gas hydrate, differential pressure, specific area of decomposition, and thermal diffusion coefficient.

机械-热联合开采天然气水合物的设备, 可以结合煤矿开采(挖掘设备、破碎设备、物料输送设备)和瑞典深部开采战略规划(环保、安全、自动控制、连续机械开挖并生产的一体化开采方式)^[19-20], 在此不作重点讨论。

能量效率估算. 结合机械-热联合开采的基本流程: 地下挖掘 → 粉碎 → 传送 → 混合 → 颗粒流输送 \ 分解 \ 分离 \ 回填 → 气体做功(注海水) → 气体输送与收集, 将各个流程的能量消耗细节进行大致估算, 综合考虑机械-热联合开采模式的各个流程中的能量消耗以及能量产出。

在此定义能量倍数的概念, 即能量倍数 Q_i/W_i . Q_i 为能量产出, W_e 为能量消耗如果 1 天产气量为标准状况下 $10\,000\text{ m}^3$. 那么, 1 天产生的甲烷气体的量为

$$n_{\text{CH}_4} = \frac{V_{\text{gST}}}{22.4\text{ L/mol}} = 4.47 \times 10^5 \text{ mol}$$

式中, V_{gST} , 天然气产量, m^3 .

水合物的分子式为 $\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 因此, 产生这些天然气水合物的物质的量为

$$n_{\text{H}} = n_{\text{CH}_4} = 4.47 \times 10^5 \text{ mol}$$

天然气水合物的体积为

$$V_{\text{H}} = \frac{n_{\text{H}} \cdot M_{\text{H}}}{\rho_{\text{H}}} = 60.3 \text{ m}^3$$

式中, 天然气水合物的摩尔质量, $M_{\text{H}} = 124 \text{ g/mol}$; 天然气水合物的密度, $\rho_{\text{H}} = 0.92 \text{ g/cm}^3$.

假定天然气水合物沉积物的孔隙度 ϕ 为 0.4, 饱和度 S_{H} 为 0.4, 则开挖 1 天的天然气水合物沉积物的体积为 $V = \frac{V_{\text{H}}}{\phi \cdot S_{\text{H}}} = 377 \text{ m}^3$; 水的体积为 $V_{\text{w}} = V \cdot S_{\text{w}} \cdot \phi = 90.5 \text{ m}^3$ (S_{w} 为含水饱和度 0.6); 土体骨架的体积 $V_{\text{s}} = 226.1 \text{ m}^3$; 天然气水合物沉积物的总质量为 $m = 7.45 \times 10^5 \text{ kg}$.

(1) 机械能消耗

电牵引采煤机, 切割、装载天然气水合物沉积物, 挖掘量 $1\,000 \text{ t/h}$, 装机总功率 900 kW , $3\,240 \text{ J/kg}$, 挖掘机械能为

$$W_{\text{c}} = 7.45 \times 10^5 \times 3\,240 \text{ J} = 2.4 \times 10^9 \text{ J}$$

刮板输送机, 借助刮板链条连续输送天然气水合物沉积物, 输送量 $1\,800 \text{ t/h}$, 总功率 $1\,200 \text{ kW}$, $2\,400 \text{ J/kg}$, 运送机械能为

$$W_{\text{tr}} = 7.45 \times 10^5 \times 2\,400 \text{ J} = 1.8 \times 10^9 \text{ J}$$

轮式破碎机, 破碎天然气水合物沉积物(岩石), 破碎能力 $2\,200 \text{ t/h}$, 最大入口断面 1 m 见方, 出口粒度 0.3 m 以下, 总功率 160 kW , 262 J/kg , 破碎消耗机械能为

$$W_{\text{pc}} = 7.45 \times 10^5 \times 262 \text{ J} = 2 \times 10^8 \text{ J}$$

(2) 颗粒流输送能耗

天然气水合物分解潜热为

$$E_{\text{H}} = n_{\text{H}} \cdot \Delta E_{\text{H}} = 3.5 \times 10^{10} \text{ J}$$

海水注入要满足天然气水合物分解的能量. 注入海水的能量为 $E_{\text{w}} = \rho_{\text{w}} \cdot V_{\text{w}} \cdot C_{\text{w}} \cdot \Delta T$ (ρ_{w} 为水的密度; V_{w} 为水的体积; C_{w} 为水的比热; ΔT 为温差). 假定温差为 10°C , 用于输送颗粒流的井筒直径为 10 cm , 那么需要注入海水的速度至少为 $v_{\text{w}} = 0.3 \text{ m/s}$. 保守起见, 这里取注入海水速度为 $v_{\text{w}} = 0.5 \text{ m/s}$. 对于天然气水合物分解和沉积物水力提升, 考虑天然气水合物完全分解后, 将水和沉积物颗粒与气体分离, 因此, 沉积物的水力提升高度 L_{s} 暂取为 200 m , 即在海床上进行分离, 也便于操作, 这适合浅层天然气水合物地层的开发. 在颗粒流输送过程中, 气体的提升作用也非常重要, 且随着多相流型的变化而变化, 初步判断天然气水合物沉积物颗粒在管道分解过程中, 可能存在从气泡流到段塞流的转变过程, 这是一个十分复杂非平衡动力学过程. 而在沉积物水力提升过程这一过程中 ($0 \sim 200 \text{ m}$), 天然气水合物分解产出甲烷气体主要以小气泡形式存在于管道中(气泡流), 其密度较水相差几十倍, 因此先以水的提升作用为主进行计算. 在后续研究中, 通过实验观测流型转化、气泡浓度等基本现象、特征和数据, 对流体的密度、计算方法进行修正完善.

管道中阻力 $\Delta P = 4f \frac{H}{D_p} \frac{\rho_{\text{w}} v^2}{2}$. 雷诺数为

$$Re = \frac{D_p v \rho_{\text{w}}}{\mu_{\text{w}}}, f = \begin{cases} \frac{16}{Re}, & Re < 4\,000 \\ \frac{79}{1\,000 Re^{0.25}}, & Re > 4\,000 \end{cases}$$

式中, H 为水头高度; D_p 为井筒直径; ρ_{w} 为水的密度; μ_{w} 为水的黏度; V_{w} 为水的速度.

泵送能量 $W_{\text{p}} = \frac{\rho_{\text{w}} g H Q}{\eta_{\text{efficiency}}}$, 流量计算 $Q = \frac{\pi D^2 v}{4}$, 水头高度计算 $H = \frac{\Delta P}{\rho_{\text{w}} g} + L_{\text{w}} + L_{\text{s}}$ (L_{w} 为海水深度; L_{s} 为海床下沉积物提升高度).

海水注入机械能为

$$W_{wj} = \frac{\pi D_p^2 v}{4} \left(\frac{\rho_w v^2}{2} + \frac{1}{\eta_{\text{efficiency}}} 4f \frac{L_s}{D_p} \frac{\rho_w v^2}{2} \right) \approx 1.0 \times 10^8 \text{ J}$$

沉积物重力项为

$$W_{mg} = V(\rho_m - 1)L_s g = 1.0 \times 10^9 \text{ J}$$

(3) 气体膨胀做功能量

以我国南海天然气水合物地区的工况为基本参数. 天然气水合物分解后气体压力 20 MPa, 温度假定为 283 K, 气体膨胀做功: $W = \int_{V_b}^{V_{st}} p dV$.

假设这一过程为等温过程, 得 $p = \frac{nRT}{V}$, 又 $V_b = \frac{p_{st} V_{st}}{p_b}$, 则有 $W = nRT \ln \left(\frac{p_b}{p_{st}} \right) = 5.7 \times 10^9 \text{ J}$. 各个过程消耗的能量和产生的能量值如下表 2.

表 2 能量估算值表

Table 2 Estimation of energy

Mechanical types	Magnitude of energy /GJ
mining-(1)	2.4
conveying-(2)	1.8
crushing-(3)	0.2
transportation of multiphase flow-(4)	0.01
seawater injection-(5)	0.1
lifting of sediments-(6)	1.0
gas expansion-(7)	5.7

由表 2, 能量倍数计算如下. 考虑将沉积物提升到海床进行气、水和土颗粒的分离: 能量倍数 $= (7)/(1+2+3+4+5+6) \approx 1.0$. 因此, 沉积物应在提升过程中进行分离回填, 这样既减少提升沉积物消耗的能量, 也能使沉积物层保持稳定, 同时也满足气体膨胀做功产生的能量抵消机械能消耗.

1.3 需要解决的关键科学问题

1.3.1 管道中含相变的气-液-固多相流动问题

粉碎后的小颗粒天然气水合物和海水的混合物在管道中运动, 且随着热传导和对流传热, 天然气水合物较快地发生分解相变, 气体逐渐以溶解态、小气泡、气塞等形式分离存在, 在管道中分段呈现不同的特征的多相流动, 即固-液两相流 \rightarrow 固-液-溶解气流动 \rightarrow 固-液-气泡流动 \rightarrow 液-气流动等, 这些物理过程中涉及非平衡动力学问题^[21-25]. 针对该问题需建立实验模拟的相似理论, 获得含化学反应多相流动的基本现象与关键参数^[26], 揭示水合物分解相

变、对流传热与流动等多个物理效应的相互作用规律, 从而指导管道尺寸和流速等的优化设计, 既要求控制颗粒直径、分解速率、颗粒与水的温差, 使气体分解速率不会过大而产生不稳定流, 又不会使水温降幅过大而结冰或生成水合物; 且流速足够大使颗粒悬浮并随水流动.

1.3.2 小颗粒天然气水合物分解率问题

目前, 描述地层中天然气水合物分解的模型大多采用 Kim 模型和看作 Stefan 问题处理^[15-16,27]. 但对于小颗粒天然气水合物分解, 各相热量的分配、气泡脱离以及水侵入沉积物孔隙影响分解相变驱动的温差, 从而影响分解效率, 因此, 需建立新的天然气水合物沉积物颗粒的分解动力学模型, 指导优化设计颗粒粉碎尺度和热量供应, 在多相流动过程中充分高效地分解天然气水合物.

1.3.3 土-水-气多组分混合物的分离及回填问题

机械-热开采要保证高效率, 应尽量减少沉积物的提升, 且水合物完全分解. 那么, 土-水-气在管道内的分离尤为重要. 混合物分离方法的选取主要取决于多组分之间的密度差、颗粒粒径、体积浓度等^[28].

1.3.4 机械-热联合开采时的地层稳定性问题

机械-热联合开采要保证安全, 我国海洋天然气水合物沉积层具有两个特征: 一是海床具有一定的坡度 ($3^\circ \sim 15^\circ$), 二是地层较软. 如何最大限度地开挖地层, 并保持地层的稳定 (既防止大范围的滑塌, 又要避免局部地层的沉陷或破坏), 如何考虑地层中水渗透的影响, 是机械热开采的关键环节.

在这些复杂的问题研究过程中, 建立流固运动与动力学的相似准则数, 选取合适的特征长度和特征时间进行模型实验和理论分析, 是重要的解决思路. 问题 (1) 在机械热联合开采中最关键, 后续将对其作重点讨论.

2 天然气水合物管道中含相变的气液固多相流动问题

2.1 小颗粒天然气水合物分解特征时间

基于含相变热传导理论进行天然气水合物沉积物分解速率分析, 暂不考虑分解气体和流体流动对分解速率的影响. Kamath 等^[15]提出的模型方程, 假定天然气水合物的热分解是一个受界面传热控制的过程, 和流体的泡核沸腾有一定相似性, 则天然气水

合物沉积物颗粒的分解速率表达为

$$\frac{\dot{n}_h}{\varepsilon_h \cdot A_h} = \xi \cdot \left(\frac{\Delta T}{T_0}\right)^{2.05} \quad (1)$$

其中, \dot{n}_h 为天然气水合物的稳态分解速率, mol/h; ε_h, A_h 分别为天然气水合物的体积分数和天然气水合物与流体界面间的表面积, cm^2 ; ξ 为分解常数, 一般取为 $63.8 \text{ mol}/(\text{h}\cdot\text{cm}^2)$; $\Delta T, T_0$ 为温差和标准状况温度, K.

假定天然气水合物沉积物颗粒为球形, 那么式(1)左边可以写为

$$\frac{\dot{n}_h}{\varepsilon_h \cdot A_h} = \frac{\rho_h \dot{V}_h / M_h}{A_h} = \frac{\rho_h}{2M_h} \frac{dD}{dt} \quad (2)$$

式中, V_h 为天然气水合物的体积; M_h 为天然气水合物的摩尔质量; ρ_h 为天然气水合物的密度; D 为颗粒的直径.

从而式(1)可以写为

$$\frac{dD}{dt} = \frac{2M_h \xi}{\rho_h} \cdot \left(\frac{\Delta T}{T_0}\right)^{2.05} \quad (3)$$

对式(3)两边分别积分, 可以得到分解时间为

$$t_d = \frac{D}{\frac{2M_h \xi}{\rho_h} \cdot \left(\frac{\Delta T}{T_0}\right)^{2.05}} \quad (4)$$

一般开采管道的直径在几厘米至几十厘米量级, 又考虑到挖掘粉碎工程的问题, 将颗粒直径选取在 $0.1 \sim 1 \text{ cm}$ 之间进行分析评价. 图 2 和表 3 均为分解时间随着天然气水合物沉积物颗粒直径和温差的变化曲线. 分解时间随着直径的增大而呈线性延长, 而随着温差的增大呈指数缩短趋势.

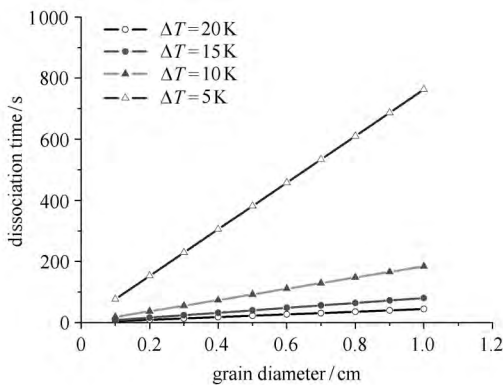


图 2 天然气水合物分解时间随粒径和温差的变化曲线

Fig. 2 Hydrate dissociation time varies with grain sizes and temperature differences

表 3 天然气水合物分解时间随颗粒粒径和温差变化数据表

Table 3 Data of hydrate dissociation time with grain sizes and temperature differences

Diameter of hydrate bearing bodies/cm	Time of complete hydrate dissociation/s				
	20 K	15 K	10 K	5 K	2 K
0.1	4	8	18	76	499
0.2	9	16	37	153	999
0.3	13	24	55	229	1.50×10^3
0.4	18	32	74	305	2.00×10^3
0.5	22	40	92	382	2.50×10^3
0.6	27	48	111	458	3.00×10^3
0.7	31	56	129	534	3.50×10^3
0.8	36	64	147	610	4.00×10^3
0.9	40	72	166	687	4.50×10^3
1	44	80	184	763	5.00×10^3

2.2 管道流体中颗粒悬浮的临界速度

由于管道中流固混合物的流体所占体积比例大, 因此, 先计算单个固体颗粒在运动流体中的受力和运动状态.

直径为 D_p 管道中, 天然气水合物沉积物颗粒直径 D 为单个固体颗粒在流体中悬浮速度^[29-31]

$$u_0 = 3.6 \sqrt{\frac{D \cdot (\rho_s - \rho_w)}{\rho_w \cdot C_D}} \cdot \left[1 - \left(\frac{D}{D_p}\right)^2\right] \quad (5)$$

其中

$$C_D = \begin{cases} 24/Re, & Re < 2 \\ 18.5/Re^{0.6}, & 2 < Re < 500 \\ 0.44, & 500 < Re < 2 \times 10^5 \\ 0.1, & Re > 2 \times 10^5 \end{cases}$$

假定速度为 1 m/s , 天然气水合物沉积物颗粒直径为 5 mm , 那么雷诺数 $Re = 5000$. 由此可以估计 C_D 可以取为 0.44 . 已知管道直径为 100 mm (小口径管道 $50.8 \sim 254 \text{ mm}$, 中口径管道 $304.8 \sim 609.6 \text{ mm}$, 大口径管道 $609.6 \sim 863.6 \text{ mm}$), 表 4 给出了不同颗粒直径条件下的颗粒临界悬浮临界速度.

根据表 3 和表 4 数据, 可以得到不同温差和水合物沉积物颗粒直径条件下, 持续供应的固体颗粒在竖直管道中的分布高度, 如表 5.

表 4 颗粒悬浮临界流体速度

Table 4 Critical fluid velocities of grain suspension

with certain sizes

Diameter of hydrate bearing bodies/cm	Critical velocity/(m·s ⁻¹)
0.1	0.22
0.2	0.31
0.3	0.38
0.4	0.44
0.5	0.49
0.6	0.53
0.7	0.57
0.8	0.61
0.9	0.64
1.0	0.67

表 5 固体颗粒的分布高度

Table 5 Occupied height of solid grains in the pipe with temperature differences

Diameter of hydrate bearing bodies/cm	Height with solid grain in the pipe/m				
	20 K	15 K	10 K	5 K	2 K
0.1	1.0	1.8	4.1	16.8	110
0.2	2.8	5.0	11.5	47.5	311
0.3	5.1	9.2	21.0	87.1	570
0.4	7.8	14.1	32.3	134	875
0.5	10.9	19.6	45.0	186	1.22×10 ³
0.6	14.2	25.6	58.9	244	1.60×10 ³
0.7	17.8	32.1	73.8	306	2.00×10 ³
0.8	21.6	39.0	89.6	371	2.43×10 ³
0.9	25.7	46.3	106	440	2.88×10 ³
1.0	29.8	53.8	124	511	3.35×10 ³

2.3 天然气水合物分解导致的水温降低

天然气水合物沉积物在流体中的传热包含 3 个物理效应, 即热传导、对流传热和天然气水合物相变效应. 因此, 其能量守恒方程为

$$C_i \rho_i \frac{\partial T}{\partial t} + C_i \rho_i u_i \frac{\partial T}{\partial x} = K_i \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho_h \Delta H \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial t} \quad (6)$$

这些过程耦合在一起非常复杂, 但目前更关心天然气水合物完全分解后整体温度的变化. 因此, 将此过程简化为稳态热传导问题处理^[31-32]. 忽略相间的传热过程, 并将式(6)两边对时间积分, 可以简化为

$$\varepsilon_h C_h \rho_h T_0 + \varepsilon_s C_s \rho_s T_0 + \varepsilon_w C_w \rho_w T_w - \varepsilon_i C_i \rho_i T_s = \rho_h \Delta H \varepsilon_h \quad (7)$$

由式(7), 天然气水合物分解后的温度

$$T_s = \left(\varepsilon_h C_h \rho_h T_0 + \varepsilon_s C_s \rho_s T_0 + \varepsilon_w C_w \rho_w T_0 + \varepsilon_w C_w \rho_w T_w - \rho_h \Delta H \varepsilon_h \right) / \left(\varepsilon_s C_s \rho_s + \varepsilon_w C_w \rho_w + \varepsilon_g C_g \rho_g \right) \quad (8)$$

若原天然气水合物沉积物颗粒温度为 2°C; 水的温度为 3 种: 7°C, 12°C 和 17°C; 天然气水合物沉积物中, 天然气水合物体积分数为 0.2, 水的体积分数为 0.2, 土颗粒的体积分数为 0.6; 水和天然气水合物沉积物的混合物中占的体积分数分别为 0.9, 0.85, 0.8, 0.7, 0.6 和 0.5 几种. 式(8)的计算结果如表 6 所示, 其中温差为负数, 表示天然气水合物分解不完全, 因此需要再根据式(8)计算天然气水合物的分解体积分数; 温差为正数表示, 天然气水合物已分解完全. 温差变化为 -2°C 以下时, 将可能出现结冰现象, 大大降低天然气水合物的分解效率.

从前述分析看出, 为了避免水合物分解过程中的不稳定流、结冰或水合物二次生成, 同时保证固体颗粒悬浮, 颗粒直径在 0.1~1.0 cm 之间时, 要控制水流速度 0.22~0.67 m/s, 温差 5K 以上, 混合比中水的体积分数在 0.85 以上.

表 6 天然气水合物分解后水温

Table 6 Water temperature estimation after hydrate dissociation

Temperature of injected water/°C	Water volume fraction	Temperature after hydrate dissociation/°C	Change of temperature/°C
7	0.9	3	0
12	0.9	7	5
17	0.9	12	10
7	0.85	0	-2
12	0.85	5	2
17	0.85	9	7
7	0.8	-2	-5
12	0.8	2	0
17	0.8	6	4
7	0.7	-8	-10
12	0.7	-4	-6
17	0.7	0	-2
7	0.6	-13	-15
12	0.6	-10	-12
17	0.6	-6	-9
7	0.5	-19	-22
12	0.5	-16	-19
17	0.5	-13	-16

3 结论与建议

我国天然气水合物的资源量较可观,是下一代的战略能源。天然气水合物的开采不同于化石能源,天然气水合物分解相变使得开采过程十分复杂,需要不断的高效的供给能量。

(1) 机械-热联合开采天然气水合物是一种新概念开采模式,这种方法利用海水的热量和对流传热解决能量供给和传热效率低的问题,需要充分将开采气体膨胀能转化为机械能。适合于具有天然气水合物分布集中、天然气水合物饱和度高、资源量大的天然气水合物地层。

(2) 为了避免水合物分解过程中的不稳定流、结冰或水合物二次生成,同时保证固体颗粒悬浮,原位挖掘天然气水合物地层后粉碎的颗粒直径初步设定在 0.1~1.0 cm 之间,控制水流速度 0.22~0.67 m/s,温差 5K 以上,混合物中水的体积分数在 0.85 以上。

机械-热联合开采天然气水合物是一种新概念开采模式,其符合非常规能源商业化开采的要求,能够为实现高效的天然气水合物开采提供新的技术储备。

参 考 文 献

- Lee S, Kim S. Onshore and offshore gas hydrate production tests. *Economic and Environmental Geology*, 2014, 47(3): 275-289
- 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
- White MD, Wurstner SK, McGrail BP. Numerical studies of methane production from Class I gas hydrate accumulations enhanced with carbon dioxide injection. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(2): 546-560
- Moridis GJ, Collett TS, Boswell R, et al. Toward production from gas hydrates: Current status, assessment of resources, and simulation-based evaluation of technology and potential. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2009, 12(5): 745-751
- Silva JMD, Dawe R. Towards commercial gas production from hydrate deposits. *Energies*, 2011, 4: 215-238
- Makogon YF, Omelchenko RY. Commercial gas production from Messoyakha deposit in hydrate conditions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2013, 11: 1-6
- 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. *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. *Energy Engineering*, 2006, 1: 15-18 (in Chinese))
- 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 (Zhang Xuhui, Lu Xiaobing, Liu Lele. Advances in natural gas hydrate recovery methods. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(2): 858-869 (in Chinese))
- 周守为,陈伟,李清平.深水浅层天然气水合物固态流化绿色开采技术. *中国海上油气*, 2014, 26(5): 1-7 (Zhou Shouwei, Chen Wei, Li Qingping. The green solid fluidization development principle of natural gas hydrate stored in shallow layers of deep water. *China Offshore Oil and Gas*, 2014, 26(5): 1-7 (in Chinese))
- 栾锡武,赵克斌,孙冬胜等.天然气水合物开采-以马利克钻井为例. *地球物理学进展*, 2007, 22(4): 1295-1304 (Luan Xiwu, Zhao Kebin, Sun Dongsheng, et al. Gas hydrates production-in case of mallik test well. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(4): 1295-1304 (in Chinese))
- Hauge LP, Birkedal KA, Ersland G, et al. Methane production from natural gas hydrates by CO₂ replacement—Review of lab experiments and field trial. *SPE*, 2014, 169198
- Lee S, Kim S. Onshore and offshore gas hydrate production tests. *Economic and Environmental Geology*, 2014, 47(3): 275-289
- Terao Y, Lay K, Yamamoto K. Design of the surface flow test system for 1st offshore production test of methane hydrate. In: *Offshore Technology Conference Asia*, Kuala Lumpur Malaysia, 2015
- 张旭辉.水合物热分解引起地层软化和破坏研究.[博士论文].中国科学院力学研究所, 2010 (Zhang Xuhui. Study on stratum softening and failure by heat-induced hydrate dissociation. [PhD Thesis]. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010 (in Chinese))
- 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
- Kim HC, Bishnoi PR, Heidemann RA, et al. Kinetics of methane hydrate decomposition. *Chemical Engineering Science*, 1987, 42(7): 1645-1653
- 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 (Sha Zhibin, Liang Jinqiang, Su Pibo, et al. Natural gas hydrate accumulation elements and drilling results analysis in the eastern part of the Pearl River Mouth Basin. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(6): 125-135 (in Chinese))
- 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
- 张红俊,周成.综合机械化采掘设备.北京:化学工业出版社, 2008 (Zhang Hongjun, Zhou Cheng. The Comprehensive Mechanized Mining Equipment. Beijing: Chemical Industry Press, 2008 (in Chinese))
- 鲁晓兵,张旭辉.机械-热开采水合物可行性论证.中国科学院力学研究所科技报告, 2012 (Lu Xiaobing, Zhang Xuhui. Feasibility study on mechanical-thermal hydrate recovery method. Scientific Report in Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012 (in Chinese))
- Jackson R. Locally averaged equations of motion for a mixture of identical spherical particles and a Newtonian fluid. *Chemical Engineering Science*, 1997, 52(15): 2457-2469

- 22 Savage SB. Streaming motions in a bed of vibrationally fluidized dry granular material. *Journal of Fluid Mechanics*, 1988, 194: 457-478
- 23 Batchelor GK. A new theory of the instability of a uniform fluidized bed. *Journal of Fluid Mechanics*, 1988, 193: 75-110
- 24 王帅, 郝振华, 徐鹏飞等. 粗糙颗粒动力学及稠密气固两相流动的数值模拟. *力学学报*, 2012, 44(2): 278-286 (Wang Shuai, Hao Zhenhua, Xu Pengfei, et al. Kinetic theory of rough spheres and numerical simulation of dense gas-particles flow. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, 44(2): 278-286 (in Chinese))
- 25 Pain CC, Mansoorzadeh S, deOliveira CRE. A study of bubbling and slugging fluidized beds using the two-fluid granular temperature model. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, 27: 527-551
- 26 刘其成, 程海清, 张勇等. 火烧油层物理模拟相似原理研究. *特种油气藏*, 2013, 20(1): 111-114 (Liu Qicheng, Cheng Haiqing, Zhang Yong, et al. Study on analogy theory of physical simulation of in-situ combustion. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2013, 20(1): 111-114 (in Chinese))
- 27 Yang H, Bai YH, Li QP. The simulation of gas production from oceanic gas hydrate reservoir by the combination of ocean surface warm water flooding with depressurization. *Acta Mechanica Sinica*, 2012, 28(5): 1287-1295
- 28 凌志光, 黄存魁. 旋流式分离器三维流场测定. *力学学报*, 1989, 21(3): 266-272 (Ling Zhiguang, Huang Cunkui. Investigation of 3D flow field in vortex type cyclone separator. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 1989, 21(3): 266-272 (in Chinese))
- 29 Richardson JF, Zaki WN. Sedimentation and fluidisation: part 1. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 1954, 32: 35-53
- 30 刘大有. 二相流体动力学. 北京: 高等教育出版社, 1993 (Liu Dayou. *Fluid Dynamics of Two-Phase systems*. Beijing: Higher education press, 1993)
- 31 Baldock TE, Tomkins MR, Nielsen P, et al. Settling velocity of sediments at high concentrations. *Coastal Engineering*, 2004, 51: 91-100
- 32 胡汉平. 热传导理论. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010 (Hu Hanping. *Theory of Heat Conduction*. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2010 (in Chinese))