

沉积物中导热体周围水合物分解范围研究¹⁾

张旭辉^{*2)} 刘艳华[†] 李清平^{**} 赵京^{*} 王爱兰^{*}

^{*}(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

[†](中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

^{**}(中海石油研究中心, 北京 100027)

摘要 沉积物水合物在热源周围的分解范围是水合物热开采以及相关灾害分析的重要基础数据。该文针对平面内边界有恒温热源的水合物热分解范围问题进行了理论分析和四氯呋喃水合物沉积物模型实验，并将两者结果进行了对比。结果表明：沉积物水合物最大分解范围主要取决于热源与环境温度的温差；热源周围水合物热分解最大范围的理论值与实验值接近，误差小于 5%。

关键词 天然气水合物，热分解，分解前锋，最大分解范围

中图分类号： TQ021.3 文献标识码： A 文章编号： 1000-0879(2010)02-039-04

THE DISSOCIATION SCOPE OF GAS HYDRATE IN DEPOSIT AROUND HEAT CONDUCTOR¹⁾

ZHANG Xuhui^{*2)} LIU Yanhua[†] LI Qingping^{**} ZHAO Jing^{*} WANG Ailan^{*}

^{*}(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

[†](China Communications Water Transportation Planning and Design Institute Company, Limited, Beijing 100007, China)

^{**}(Research Centre, China Ocean Oil Company, Beijing 100027, China)

Abstract The thermal dissociation scope of gas hydrate in deposit around heat conductor is very important for either gas hydrate exploitation or related hazard prevention. Maximum dissociation scope based on planar heat dissociation under the boundary condition of constant temperature is obtained and compared with that obtained in heat dissociation experiments of THF hydrate in deposit in this paper. It is shown that the maximum dissociation scope is determined by the difference between the temperatures of heat source and surrounding environment. The theoretical results of the maximum dissociation scope are in agreement with those of experiments, with errors less than 5%.

Key words gas hydrate, heat dissociation, the front of dissociation, maximum dissociation scope

引言

天然气水合物是在高压低温条件下由天然气分子与水分子形成的类冰的晶体，自然界的水合物广泛分布在大陆冻土带、海底沉积物以及一些内陆湖的深水环境中，是一种重要的潜在能源^[1,2]，然而，开采水合物可能引发系列灾害，如水合物分解引起海底滑坡、结构破坏和井喷等^[3,4]。

在钻井、油气开采或水合物加热开采过程中，高

温输油管道或高温水管等穿过水合物沉积层时，由于钻井液、油气或水的温度较高，热量传递到周围含水合物的沉积层中，使沉积物中的水合物相平衡破坏而分解^[5,6]，从而导致地基强度降低，基础丧失稳定性，导致海上结构物的倾覆、管道断裂、油气井毁坏，甚至引发更加严重的连锁危害^[7,8]。热水(油)管周围水合物分解前锋的扩展以及分解的范围直接影响开采效果或水合物分解引起的灾害范围，但是

2009-03-19 收到第 1 稿， 2009-07-17 收到修改稿。

1) 国家高技术研究发展专项 (863) 经费和中科院三期创新方向性项目 (KJCX2-YW-L02) 资助。

2) 张旭辉，男，博士研究生，工程力学专业，从事水合物开采关键力学问题研究。E-mail: zxh424@163.com

对这种热源周围水合物分解范围的控制参数和演化过程等方面的研究数据还很缺乏。

鉴于此,本文将针对平面内边界有热源条件下,水合物分解范围问题进行分析。首先针对平面内边界有恒温热源下的热分解进行理论分析;然后进行水合物沉积物热分解模型实验,并与理论分析结果对比,为水合物开发和相关灾害分析提供参考。

1 平面有限域内水合物热分解的理论分析

考虑热水(油)管垂直穿过水合物地层,管内温度恒定,水合物层周边的环境温度由于尺度较水合物层大得多而保持不变的条件下,热量从水(油)管向周围水合物层传播而引起的水合物分解,如图 1 所示。在左边界 $x = 0$ 处为水(油)管位置,温度恒定为 $T = T_c$,其他边界条件均为环境温度 T_0 ;水合物层尺度为长 \times 厚 $= l \times h$,长度较厚度大。求解水合物最大分解范围。

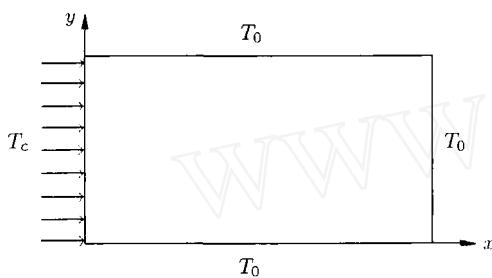


图 1 平面热分解问题示意

由于水合物分解相变吸热主要影响水合物分解前锋推进速度,对最终分解范围的影响较小,因此理论分析模型中暂不考虑水合物相变吸热;假定热分解在瞬间完成,分解后的水或气能排出而不产生超压;为简化分析,假设水合物均匀分布,不考虑分解后热传导系数的变化。因此,水合物热分解影响范围主要由热传导控制。这样,问题的控制方程即为平面内的热传导控制方程

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad a^2 = k/c\rho$$

边界条件

$$x = 0 : T = T_c$$

$$x = l : T = T_0$$

$$y = 0 : T = T_0$$

$$y = h : T = T_0$$

初始条件

$$t = 0 : T = T_0$$

由分离变量法可以得到该问题的解为

$$\begin{aligned} T = T_0 + & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{l-x}{l} \frac{2(T_c-T_0)}{n\pi} [1 - (-1)^n] \sin \frac{n\pi}{h} y - \\ & \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4(T_c-T_0)}{mn\pi^2} [1 - (-1)^n] \cdot \\ & \exp \left\{ - \left[\left(\frac{am\pi}{l} \right)^2 + \left(\frac{an\pi}{h} \right)^2 \right] t \right\} \cdot \\ & \sin \frac{m\pi}{l} x \sin \frac{n\pi}{h} y - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4(T_c-T_0)}{mn\pi^2} \cdot \\ & [1 - (-1)^n] \frac{\beta_n}{\beta_n + \left(\frac{am\pi}{l} \right)^2} \cdot \\ & \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{an\pi}{h} \right)^2 + \left(\frac{am\pi}{l} \right)^2 \right] t \right\} \cdot \\ & \sin \frac{m\pi}{l} x \sin \frac{n\pi}{h} y \end{aligned} \quad (1)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时,式(1)可化为

$$\begin{aligned} T = T_0 + & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{l-x}{l} \frac{2(T_c-T_0)}{n\pi} [1 - (-1)^n] \sin \frac{n\pi}{h} y - \\ & \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4(T_c-T_0)}{mn\pi^2} [1 - (-1)^n] \cdot \\ & \frac{\left(\frac{n\pi}{h} \right)^2}{\left(\frac{n\pi}{h} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{l} \right)^2} \sin \frac{m\pi}{l} x \sin \frac{n\pi}{h} y \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)看出:当 $t \rightarrow \infty$ 时,温度在平面内的分布与 $a^2 = k/c\rho$ 无关,最大分解范围主要取决于热源温度与环境温度的差值。

2 模型试验

2.1 模型实验布置及实验步骤

模型布置:由于实验室在大尺度的模型箱中合成甲烷水合物沉积物耗费气量大、合成时间长、分布不均匀、分解过程控制难度高,而四氢呋喃水合物(分子式为 $8C_4H_8O \cdot 136H_2O$)沉积物的热物理性质相似且更加经济安全,故选择四氢呋喃水合物沉积物来进行研究。

为便于观察并且与平面域内理论分析相对应,采用长方体有机玻璃模型箱,尺寸为长 \times 宽 \times 厚 $= 50\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ (图 2)。宽度较长度小得多,可以认为是平面二维模型。模型箱壁的热传导系数远小于沉积层的热传导系数,对影响圈的最大范围影

响不大。采用功率 400 W 的电热棒作为热源加热, 用量程为 $-30^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$ 的温控器控制电热棒温度, 采用秒表记录时间。

试验步骤如下:

(1) 在模型箱内铺入干密度为 1.6 g/cm^3 的粉细砂作为沉积层, 中间垂直布置功率为 400 W 电热棒与温控器, 然后用质量分数为 19% 的四氢呋喃溶液饱和。

(2) 将模型箱放入冰箱内, 制冷温度为 -8°C , 冷冻 3 d。

(3) 将模型箱取出, 调整控温器的温度分别为 100°C , 150°C , 200°C 和 300°C , 加热分解水合物沉积物, 记录时间与分解前锋位置。

(4) 水合物分解前锋不再推进时, 停止加热, 记录电热棒的中心与分解前锋的距离, 作为最大分解范围。

2.2 实验结果与理论分析结果的对比

当开始加热后, 加热棒周围 5 cm 以内(即加热棒与侧壁的距离), 分解前锋以圆形发展; 超过 5 cm, 则呈平面发展, 故分解范围的扩展可以认为是平面问题。图 2 给出了实验中某一时刻的四氢呋喃水合物分解前锋位置。可以看出, 水合物分解区域与未分解区域有明显的界限, 即分解前锋, 将该前锋位置与热源中心的距离称为分解范围长度。通过土面上的刻度尺测量各个时刻分解范围长度。4 种实验条件下的实测值见图 4。

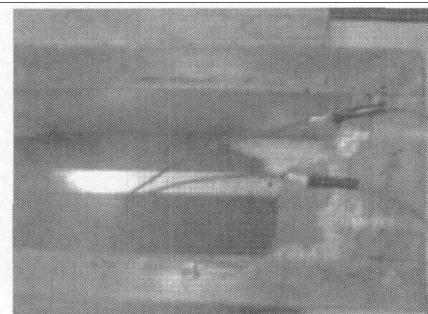


图 2 水合物分解的前锋

在式(2)中代入试验基本参数: $T_0 = -8^{\circ}\text{C}$, $l = 0.25 \text{ m}$, $h = 0.24 \text{ m}$, T_c 分别为 100°C , 150°C , 200°C , 300°C 时, 可以得到理论的温度分布(见图 3)。在一个大气压下, 四氢呋喃水合物稳定存在相平衡温度是 $T_e = 4^{\circ}\text{C}$, 故将温度 $T = 4^{\circ}\text{C}$ 代入式(2)中, 求得对应的 x 值即为水合物分解最大范围的理论值。边界控制温度分别为 100°C , 150°C , 200°C , 300°C 时,

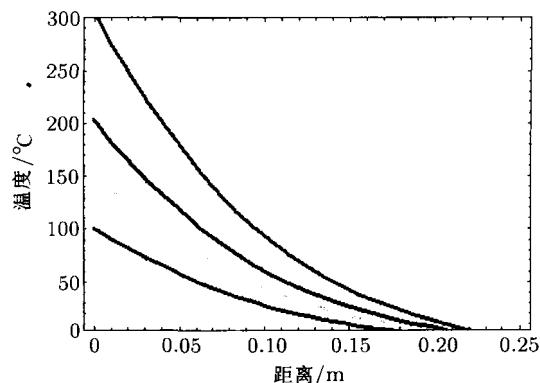


图 3 沿 x 方向温度的分布

理论最大范围分别为 17.5 cm , 19.5 cm , 20.7 cm , 22.0 cm 。

图 4 给出了 100°C , 150°C , 200°C , 300°C 时最大分解范围的理论值及实验值的对比。可以看到, 相同加热条件下理论分析与实验得到的最大分解范围接近, 误差小于 5%。这个误差主要是实验过程中分解范围内水合物分解出的四氢呋喃和水逐渐蒸发掉, 热传导系数增大导致的; 热源是圆柱形电热棒, 实验布置不完全对称, 致实验中最大分解范围增大; 如果液体或气体不能排出而产生超压, 则平衡温度会升高, 热分解范围就会减小。

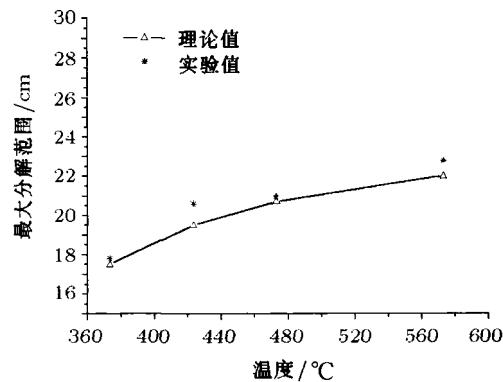


图 4 理论分析与实验的分解范围比较

3 结语

针对平面内边界有热源的水合物热分解范围进行了理论分析和模型实验, 并将二者进行了对比。主要结果如下:

(1) 热源周围水合物的分解范围在每一个给定条件下都有一个最大值。

(下转第 25 页)

流固耦合中的界面弱耦合问题，未考虑非定常流的影响和周边环境与场地的影响，也未考虑风场中能量的输运和温度影响问题，因此与实际的风场中的流固耦合分析有一定的差别。但通过理想模型的分析得到的规律和结果，可为将来考虑各种实际因素的精细计算模型打下基础。通过本文的分析比较也可以看出用流固耦合方法分析长索结构在复杂风场下的振动响应的必要性。在 2010 年上海世博会场馆及相关配套设施中大量采用了索结构和膜结构。作者希望本文能起抛砖引玉作用，引起大家对索膜结构类型的柔性结构体系在风场中流固耦合力学问题的重视。

参 考 文 献

- 1 邢景棠, 周盛, 崔尔杰. 流固耦合力学概述. 力学进展, 1997, 27(1): 19~38 (Xing Jingtang, Zhou Sheng, Cui Erjie. A survey on the fluid-solid interaction mechanics. *Advances in Mechanics*, 1997, 27(1): 19~38 (in Chinese))
- 2 钱若军, 董石麟, 袁行飞. 流固耦合理论研究进展. 空间结构, 2008, 14(1): 3~15 (Qian Ruojun, Dong Shilin, Yuan Xingfei. Advances in research on fluid-structure interaction theory. *Spatial Structures*, 2008, 14(1): 3~15 (in Chinese))
- 3 项海帆, 陈艾荣. 特大跨度桥梁抗风研究的新进展. 土木工程学报, 2003, 36(4): 1~8 (Xiang Haifan, Chen Airong. Recent advances in research on aerodynamics of extra long span bridges. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 36(4): 1~8 (in Chinese))
- 4 Kawakita S, Zienkiewicz B, Cermak JE. Aeroelastic model study of suspend cable roof. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 1992, 41-44: 1459~1470
- 5 Tezduyar TE, Sathe S, Stein K. Modeling of fluid-structure interactions with the space-time techniques. *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, 2006, 53: 50~81
- 6 Wall WA, Gerstenberger A, et al. Large deformation fluid-structure interaction – advances in ALE methods and new fixed grid approaches. *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, 2006, 53: 195~232
- 7 Morgenthal G, Walther JH. An immersed interface method for the vortex-in-cell algorithm. *Computers & Structures*, 2007, 85: 712~726
- 8 Unger R, Haupt MC, Horst P. Application of lagrange multipliers for coupled problems in fluid and structural interactions. *Computers & Structures*, 2007, 85: 796~809
- 9 Acikgoz N, Bottasso CL. A unified approach to the deformation of simplicial and non-simplicial meshes in two and three dimensions with guaranteed validity. *Computers & Structures*, 2007, 85: 944~954
- 10 Bathe KJ, Zhang GH. Finite element developments for general fluid flows with structural interactions. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 60: 213~232
- 11 Kohno H, Bathe KJ. A nine node quadrilateral FCBI element for incompressible fluid flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2006, 51: 673~699

(责任编辑: 刘丽)

(上接第 41 页)

(2) 在分解过程中没有产生超压的情况下, 最大分解范围只与热源温度与环境温度的差值有关, 而与热物性参数无关, 后者仅决定热传导的快慢。

(3) 理论结果与实验结果符合较好, 理论分析可用于类似的问题。

参 考 文 献

- 1 Dickens GR. The potential volume of oceanic methane hydrates with variable external conditions. *Organic Geochemistry*, 2001, 32: 1179~1193
- 2 Buffett B A, Archer D. Global inventory of methane clathrate: Sensitivity to changes in the deep ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 227: 185~199
- 3 Kvenvolden KA. Potential effects of gas hydrate on human welfare. *Proc Natl Acad Sci*, 1999, 96: 3420~3426
- 4 Koh CA. Towards a fundamental understanding of natural gas hydrates. *Chem Soc Rev*, 2002, 31: 157~167
- 5 Briaud JL, Chaouch A. Hydrate melting in soil around hot conductor. *J Geotech and Geoenvir Engrg*, 1997, 123: 645~653
- 6 Chaouch A, Briaud JL. Post melting behavior of gas hydrates in soft ocean sediments. In: 29th offshore technology conference proceedings, Geology, earth sciences and environmental factors: Society of Petroleum Engineers, 1997, 1: 217~224
- 7 Sultan N, Cochonat P, Foucher JP, Mienert J. Effect of gas hydrates melting on seafloor slope instability. *Marine Geology*, 2004, 213: 379~401
- 8 Chaouch A, Briaud JL. Hydrate melting and related foundation problems. *OTRC Report*, Department of Civil engineering, Texas A&M University, College Station, Texas, 1994

(责任编辑: 何漫丽)