

间壁换热开采天然气水合物注入温度优化

陈 花¹ 关富佳^{1,2} 张 杰¹ 肖启圣¹ 程 亮¹

1. 长江大学石油工程学院, 湖北 武汉 430100;
2. 长江大学非常规油气湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430100

摘 要:热力学法是目前公认可行的天然气水合物开采方法之一。关于如何在热采过程中提高注入能量利用率,使开采所得甲烷气体的总热值与注入热量之比最大的研究,目前大多集中于注入温度的优化方面。从获得最大产气速率的角度出发,在能量利用率的基础上,定义新的热效率为单位产气量下的水合物注热开采能量利用率。并引用无限长圆柱体换热反应釜概念,建立间壁换热开采水合物过程中等温边界条件下一维瞬态传热新模型,通过推导间壁换热过程中传热量和传热时间的解析表达式,求得在开采温度 20 ~ 100 ℃ 的条件下,间壁换热开采水合物的热效率在 0.431 ~ 0.536 之间。最优注入温度为 65 ℃,热效率为 0.536。

关键词:间壁换热;水合物;优化

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.02.015

Temperature Optimization of Natural Gas Hydrate Injection in Inter-Wall Heat Transfer Recovery

Chen Hua¹, Guan Fujia^{1,2}, Zhang Jie¹, Xiao Qisheng¹, Cheng Liang¹

1. Petroleum Engineering College of Yangtze University, Wuhan, Hubei, 430100, China;
2. Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan, Hubei, 430100, China

Abstract: Thermodynamic method is currently recognized as one of the feasible exploitation methods for natural gas hydrate. How to improve the utilization ratio of injected energy in the thermal recovery process so as to maximize the ratio of the total calorific value of methane gas, the injected calorific value is mostly focused on the analysis of the optimal injection temperature. From the point of view of obtaining the maximum gas production rate, on the basis of energy utilization rate, this paper defines a new thermal efficiency as the energy utilization rate of hydrate heat injection under the unit gas production rate. Based on the concept of infinite cylindrical heat transfer reactor, a new one-dimensional transient heat transfer model under isothermal boundary conditions is established. By deriving the analytical expressions of heat transfer quantity and time in the process of inter-wall heat transfer, the thermal efficiency of inter-wall heat transfer for hydrate extraction is found to be between 0.431 and 0.536 at the mining temperature of 20 ~ 100 ℃. The optimum injection temperature is 65 ℃ and the thermal efficiency is 0.536.

Keywords: Inter-wall heat transfer; Hydrate; Optimization

收稿日期:2019-02-10

基金项目:湖北省高等学校大学生创新创业训练项目“间壁换热开采天然气水合物实验研究”(2018323)

作者简介:陈 花(1994-),女,江西萍乡人,硕士研究生,现从事油气田开发方面的研究工作。

0 前言

天然气水合物(NGH)是一种由天然气中分子量较小的气体分子与水分子在低温和高压条件下形成的类冰状笼形晶体结构^[1]。水分子之间通过氢键相互作用,水分子与气体分子间通过范德华力作用,形成I型、II型、H型和T型四种立体的晶体结构^[2]。其中,水分子由于氢键连接形成笼形结构,包裹客体分子,保证了NGH能较大量地储存天然气。在标准状态下,1 m³的NGH能储存150~180 m³的天然气^[3]。NGH的地质储量范围为0.2×10¹⁵~3.053×10¹⁵ m³^[4],是全球陆上已探明的传统化石能源总量的2倍,被认为是未来石油天然气的替代品^[5],其巨大的资源潜力已引起油气工业界的普遍关注^[6-7]。

到目前为止,关于水合物分解实验的研究已经取得了一些进展,但大部分集中在室内实验和相平衡条件方面,水合物热激分解的模型及最优参数的研究很少。1982年Holder G D等人^[8]首次建立了热力法开采水合物的数学模型,从热力学的角度论证了热力法开采天然气水合物的可行性。2001年Tohidi B等人^[9]在不考虑地层散热情况下,采用理论模型计算热力法分解的能量效率介于3~7之间。2006年李刚等人^[10]研究了热盐水分解多孔介质中甲烷水合物过程的移动边界问题,定义热效率为用于水合物分解的热量与输入热量之比,能量效率为开采所得甲烷气体的总热值与输入能量之比,得到热效率为40%~70%,能量效率为0.074~0.113。2006年唐良广等人^[11]研究了热力法开采水合物过程中含水合物沉积物的温度分布,发现沿着反应釜存在一个温度梯度,即热流具有方向,并得到能量效率为0.4~2.6,但只是定性分析了注入热水的温度、速率以及水合物饱和度的影响,并未定量给出最优值。2010年李淑霞等人^[12]利用自制的一维天然气水合物开采模拟实验系统,研究了多孔介质中天然气水合物注热盐水分解动态过程,得出了注热温度为60℃时,能量效率为3.86。2011年李明川等人^[13]通过热电偶和电阻测试分析了水合物分解前缘的规律性,并将分解过程分为升温、分解和前缘突破三个阶段,但其并未明确定义和区分注热前缘与分解前缘,且其拟合模型中假设了分解过程为活塞式驱进,忽略了注入水的重力作用和水的指进现象。本文推导了间壁换热开采水合物过程中,等温边界条件下一维瞬态传热公式,并得出其传热量和传热时间的解析解。在此基础上优化注入温度,定义新的热效率为单位产气量下的水合物注热开采能量利用率,分析热力学法开采水合物热效率和传热时间随注入温度的变化规律。

1 数学模型

1.1 模型建立

考虑到热力法开采水合物的过程中外界与反应釜体系不发生物质交换,本文从间壁换热的角度出发,选用恒温水槽浴进行热量输送,通过换热盘管循环热水瞬时对反应釜壁面进行升温处理,换热示意简图见图1。

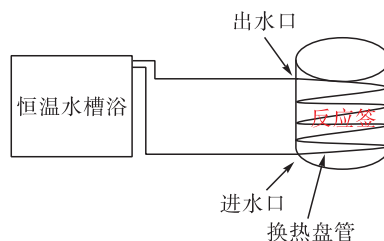


图1 间壁换热示意简图

基于本次选用的水合物合成反应釜体系为一圆柱体,温度场关于中心轴对称,壁面温度仅沿径向坐标 r 方向发生变化,即为一维非稳态传热过程。本次采用无限长圆柱体坐标系描述导热微分方程,不考虑对流换热,其温度场满足如下等式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: T 为反应釜任一点温度,K; t 为加热时间,s; α 为热扩散率,m²/s; x 为任意一点的位置。

其中:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (2)$$

式中: λ 为介质的导热系数,W/(m·K); ρ 为介质的密度,针对多孔介质体系取值1500 kg/m³; c 为介质的比热容,针对混合物质按照质量分数加权取值为1.2 kJ/(kg·K)

初始条件:

$$t = 0 \quad T = T_2 \quad (0 \leq x \leq R) \quad (3)$$

边界条件:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (\text{轴心对称性}) \quad t > 0 \quad (4)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=R} = h(T|_{x=R} - T_w) \quad (\text{边界热交换}) \quad t > 0 \quad (5)$$

式中: T_2 为合成反应结束后反应釜体系温度值,K; h 为介质之间的表面传热系数,取值12 W/(m²·K); R 为反应釜半径,取值0.075 m。 T_w 为壁面换热盘管突变温度值,K。

基于物质的材料成分、内部结构、密度、压力、温度和吸湿性等因素对导热率的取值存在影响^[14-16],本文从优选注入温度的角度出发,单因素分析温度对导热率的影响。经验公式显示导热率与温度满足二次方和三次

方关系,考虑到计算复杂程度,将曲线回归成线性关系,近似表示为^[17]:

$$\lambda = \lambda_0(1 + bT) \quad (6)$$

式中: λ_0 为 273.15 K 时的导热系数, W/(m·K); b 为常数, 10^{-3} 级。

引入过剩温度 θ 和毕渥准则,同时考虑公式简化,定义如下等式:

$$\theta(x, t) = T(x, t) - T_w \quad (7)$$

$$Bi = \frac{hR}{\lambda} \quad (8)$$

求得:

$$\frac{\varepsilon R \lambda}{(hR)} = \cot(\varepsilon R) \quad (9)$$

$$\beta = \varepsilon R \quad (10)$$

式中: ε 为一常数,无量纲; Bi 为毕渥常数,无量纲,本次取值 0.75; β 为特征方程的根,无量纲,本次取值 0.77。

将式(8)和式(10)带入到式(9)中,获得如下等式:

$$\frac{\beta}{Bi} = \cot \beta \quad (11)$$

解得:

$$\frac{\theta(x, t)}{\theta_0} = \frac{2 \sin \beta}{\beta + \sin \beta \cos \beta} \cos \left(\beta \frac{x}{R} \right) \exp \left(-\beta^2 \frac{\alpha t}{R^2} \right) \quad (12)$$

$$Q_t = \rho c V (T_w - T) \quad (13)$$

式中: θ_0 为反应釜体系温度 T_2 与注入温度 T_w 差值, K。

2 分析与讨论

2.1 热采能量利用率及热效率

在传统接触注热开采天然气水合物过程中,注热温度、注热速率、水合物藏初始温度和水合物藏初始饱和度均对最终产气速率存在较大影响^[18]。后期加热方式发展为微波加热和太阳能加热,在热采过程中水合物藏与外界仅存在能量交换,有效提高了换热过程中的能量利用效率^[19]。本文从间壁换热开采天然气水合物的角度出发,在不考虑热水运输过程中热损失和通过水合物上下盖层散热的情况下,综合考虑注热效率与水合物分解时的产气速率,实时匹配生产动态,定义了以下参数:

1) 水合物开采能量利用率,定义为用于分解水合物消耗的热量与总的输入热量的比值。

2) 热效率,定义为单位产气量下的水合物开采能量利用率。

$$\eta' = \frac{Q_{\text{con}}}{Q_{\text{inj}}} \quad (14)$$

$$\eta = \frac{V_g}{t} \cdot \eta' \quad (15)$$

式中: η' 为能量利用率,无量纲; η 为热效率, cm^3/s ; Q_{con}

为水合物分解过程消耗的热量, J; Q_{inj} 为水合物分解过程注入的热量, J; V_g 为热采过程产气量, cm^3 ; t 为热采过程持续时间, s。

2.2 热换热过程分析

甲烷水合物合成过程结束后,首先循环热水预热换热盘管管壁,再在反应釜内生成的水合物区传热。此过程中维持循环热水温度不变,保证热量传导至水合物区中心时,温度高于甲烷水合物分解所需的相平衡温度,确保水合物分解完全。

引入 F_0 (即 $F_0 = \frac{\beta t}{\delta^2}$), 则 $\frac{\theta(x, t)}{\theta_0}$ 是关于 F_0 、 Bi 以及

$\frac{x}{\delta}$ 的函数,查阅章熙民等人著《传热学》(5 版)^[20] 无限

长圆柱无量纲中心温度 $\frac{\theta(x, t)}{\theta_0} = f(Bi, F_0)$ 图版,温度范围在 20 ~ 100 °C 之间时, $\frac{\theta(x, t)}{\theta_0}$ 与 F_0 为负相关的线性关系,即随着注入温度的升高,甲烷水合物分解所需加热时间减小。间壁换热开采甲烷水合物以井筒为中心, 0.75 cm 半径区域内的甲烷水合物需 0.40 ~ 0.94 h,温度低于 35 °C 时,分解所需加热时间迅速上升,是由于注入温度较低时,其接近于水合物区中心的相平衡温度,即 $T(R, t)$, 反应过程较为缓慢。升高温度,分解所需加热时间降低,曲线趋于平稳,见图 2。

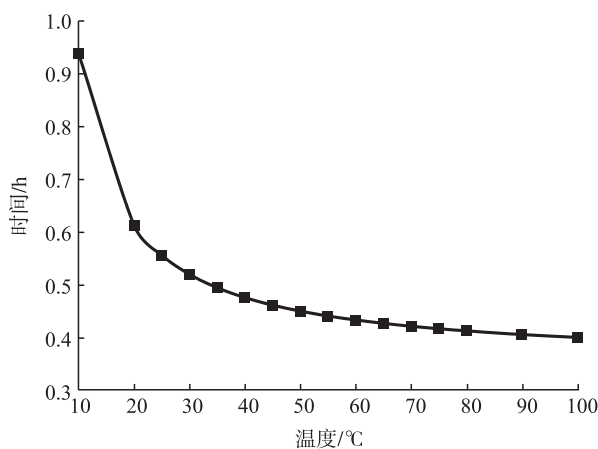


图 2 注入温度与加热时间关系曲线

2.3 温度对热效率的影响

注入温度与热效率关系曲线见图 3, 热效率随着温度的升高,先增大后减小,存在最优注入温度和热效率。

这是由于 $\eta = \frac{V_g}{t} \cdot \frac{Q_{\text{con}}}{Q_{\text{inj}}}$, 温度较低时,水合物分解所需加热时间较长,产气速率慢,具有较低的开采效率,但此时的能量利用率高,热损耗小;温度较高时,有效能量利用率低,注入水在循环过程中热损耗大,大部分热量未用于储层的升温和水合物的分解,具有较低的热采能量利用率。因此,注入温度太低或太高均不利于间壁换热开

采甲烷水合物。对于整个甲烷水合物开采过程,通过理论计算出的热效率介于0.431~0.536之间,即分解过程中,生产1 000 cm³的甲烷气体在单位时间内消耗的热量与注入的热量之比为0.431~0.536。

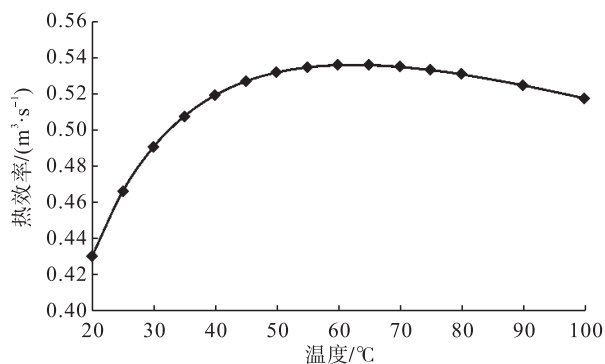


图3 注入温度与热效率关系曲线

3 结论

1) 热力学法开采天然气水合物的过程主要存在以下两个问题:一是在较低的换热温度条件下,表现为水合物产气速率较低,开采过程持续时间长,经济效益低,不具备工业产值;二是在较高换热温度条件下,表现为水合物产气过程存在较大的能量消耗,用于开采水合物的有效能量较低,经济成本较高。

2) 新定义的热效率综合考虑了能量的有效利用率及水合物注热分解所需时间,同时保证了两者的合理性。建立的数学模型计算结果显示,存在最优的注入温度使得热效率最高,其中最优注入温度为65℃,热效率为0.536。

参考文献:

- [1] 胡春, 裴俊红. 天然气水合物的结构性质及应用[J]. 天然气化工, 2000, 25(4): 48-52.
Hu Chun, Qiu Junhong. Structures, Properties and Applications of Natural Gas Hydrates [J]. Natural Gas Chemical Industry, 2000, 25(4): 48-52.
- [2] Koh C A. Towards a Fundamental Understanding of Natural Gas Hydrates [J]. Chemical Society Reviews, 2002, 31(3): 157-167.
- [3] 刘道平, 潘云仙, 周文铸, 等. 喷雾制取天然气水合物过程的特性[J]. 上海理工大学学报, 2007, 29(2): 132-136.
Liu Daoping, Pan Yunxian, Zhou Wenzhu, et al. Performance of Natural Gas Hydrate Production Process in a Batch Reactor with Water Spraying [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2007, 29(2): 132-136.
- [4] Licence P. Clathrate Hydrates of Natural Gases [J]. Fuel, 2008, 87(13-14): 3158.
- [5] 伍开松, 贾同威, 廉栋, 等. 海底表层天然气水合物藏采掘工具设计研究[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(2): 225-231.
Wu Kaisong, Jia Tongwei, Lian Dong, et al. Research on Design of Mining Tools of Marine Gas Hydrates Reservoirs [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(2): 225-231.
- [6] 吴传芝, 孙长青, 赵克斌, 等. 水合物储运天然气技术研究进展[J]. 天然气与石油, 2017, 35(1): 29-35.
Wu Chuanzhi, Sun Changqing, Zhao Kebin, et al. Research Advances of Hydrate-Based Technology for Transport of Natural Gas [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35(1): 29-35.
- [7] 张杰, 陈花, 关富佳, 等. 天然气水合物注二氧化碳置换程度计算新模型[J]. 天然气与石油, 2018, 36(3): 55-59.
Zhang Jie, Chen Hua, Guan Fujia, et al. A New Model for Calculating the Degree of Gas Hydrate Displacement with the Injection of CO₂ [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36(3): 55-59.
- [8] Holder G D, Angert P F. Simulation of Gas Production from a Reservoir Containing Both Gas Hydrates and Free Natural Gas: SPE 11105 [R]. New York: SPE, 1982.
- [9] Tohidi B, Anderson R, Ben Clennell M, et al. Visual Observation of Gas-Hydrate Formation and Dissociation in Synthetic Porous Media by Means of Glass Micromodels [J]. Geology, 2001, 29(9): 867-870.
- [10] 李刚, 唐良广, 黄冲, 等. 热盐水开采天然气水合物的热力学评价[J]. 化工学报, 2006, 57(9): 2033-2038.
Li Gang, Tang Liangguang, Huang Chong, et al. Thermodynamic Evaluation of Hot Brine Stimulation for Natural Gas Hydrate Dissociation [J]. Journal of Chemical Industry & Engineering, 2006, 57(9): 2033-2038.
- [11] 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 Liangguang, 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.
- [12] 李淑霞, 郝永卯, 陈月明. 多孔介质中天然气水合物注热盐水分解实验研究[J]. 太原理工大学学报, 2010, 41(5): 680-684.
Li Shuxia, Hao Yongmao, Chen Yueming. Experimental Study of Hot-brine Stimulation for Dissociation of NGH in Porous Medium [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2010, 41(5): 680-684.
- [13] 李明川, 陈月明. 多孔介质中天然气水合物注热盐水分解实

- 验研究[J]. 东华理工大学学报:自然科学版, 2011, 34 (3): 266 - 270
- Li Mingchuan, Chen Yueming. Experimental Research on Hot Water Flooding Dissociation of Natural Gas Hydrates in Porous Medium [J]. Journal of East China Institute of Technology: Natural Science Edition, 2011, 34 (3): 266 - 270.
- [14] 张家荣, 赵廷元. 工程常用物质的热物理性质手册[M]. 北京: 新时代出版社, 1987.
- Zhang Jiarong, Zhao Tingyuan. Handbook of Thermophysical Properties of Common Engineering Materials [M]. Beijing: New Time Press, 1987.
- [15] 陈则韶. 量热技术和热物性测定[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1990.
- Chen Zeshao. Calorimetric Technology and Determination of Thermophysical Properties [M]. Beijing: Press of China University of Science and Technology, 1990.
- [16] 王 丰. 液体和气体的热物理性质表[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- Wang Feng. Table of Thermophysical Properties of Liquids and Gases [M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [17] 王保国. 传热学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- Wang Baoguo. Heat Transfer [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [18] Moridis G J, Collet T S, Dallimore S R, et al. Numerical Studies of Gas Production from Several CH₄ Hydrate Zones at the Mallik Site, Mackenzie Delta, Canada [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2002, 43 (3): 219 - 238.
- [19] 董福海, 樊栓狮, 梁德青. 间壁换热分解开采天然气水合物的实验模拟[J]. 化工学报, 2008, 59 (6): 1502 - 1507.
- Dong Fuhai, Fan Shuanshi, Liang Deqing. Experimental Simulation Investigation on Production Behavior of Natural Gas Hydrate with Surface Heat Exchanger [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2008, 59 (6): 1502 - 1507.
- [20] 章熙民, 任泽霖, 梅飞鸣. 传热学[M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- Zhang Ximin, Ren Zepei, Mei Feiming. Heat Transfer [M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.

中国石油智慧管网建设顶层设计基本完成

2019 年 3 月 21 日至 22 日, 中国智能化油气管道技术交流会暨智慧管网技术交流会在京召开。会议围绕管道设计数字化、施工机械化、物采电子化、管理信息化及大数据、云计算、物联网、移动应用等信息技术在智能化管道及智慧管网中的应用展开深入探讨。

当前和今后一个时期是管道业务发展大有作为的战略机遇期, 国家《中长期油气管网规划》明确 2025 年全国管网规模将达到 $24 \times 10^4 \text{ km}^2$, 我国油气长输管道将迎来新的建设高峰。围绕智慧管网建设, 中国石油、中国石化、中国海油及科研院所已经开展了相关的工作, 中国石油智慧管网建设顶层设计基本完成, 初步确定了发展思路和技术路线, 中国石化智能化管道项目也取得了初步成效。

作为探索智能化油气管道建设的“先行者”, 目前中国石油正通过中俄东线智能管道试点开展数字孪生体应用和区域天然气管网运行优化研究, 下一阶段将逐步实现新建管道和在役管道的全面智能化提升, 最终形成智慧管网。中国工程院院士黄维和在会上指出, 我国智慧管网建设要在保证安全和高效运营的基础上实现感知、预判、管控和自适应一体化。相关单位应加强管道技术孪生体构建与应用技术、油气管道线路和站场感知技术、油气管道大数据挖掘和智能评价技术、智慧管道知识库构建与综合决策技术研究。

会议由中国石油学会、中国石油、中国石化、中国海油、延长石油联合主办。国家能源局相关领导、中国工程院院士、石油石化企业, 相关高校、科研院所等单位共 600 余人参加会议。

(周 舟 摘自中国石油网)