

水合物开采过程中影响套管式加热器对井周地层 加热效果的数值模拟

康家浩^{1,2}, 郭威^{1,2}, 陆程^{3,4}, 李冰^{1,2},
贾瑞^{1,2}, 陆红锋⁴, 张鹏宇^{1,2}, 杨翔^{1,2}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026;
3. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 4. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

摘要:套管式加热器在维持孔壁稳定的同时还可实现对井周地层加热,以防止水合物开采过程中井周形成二次水合物。为分析水合物开采过程中日产水量、气水比和加热功率对井周地层温度分布的影响,采用 COMSOL Multiphysics 对加热过程进行模拟。模拟结果表明,日产水量对加热效果的影响明显大于加热功率,加热功率主要影响近井段的地层温度,气水比主要影响加热半径。通过数值模拟对套管加热器的加热效果进行了分析和评价,对天然气水合物的经济高效开采具有指导意义。

关键词:套管式加热器;加热功率;二次水合物;日产水量;气水比;数值模拟

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)06-0001-07

Numerical simulation of heating process of casing heater in natural gas hydrate production wells

KANG Jiahao^{1,2}, GUO Wei^{1,2}, LU Cheng^{3,4}, LI Bing^{1,2},

JIA Rui^{1,2}, LU Hongfeng⁴, ZHANG Pengyu^{1,2}, YANG Xiang^{1,2}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

2. Key Lab of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions of Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China;

3. Oil and Gas Resources Investigation Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China;

4. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou Guangdong 510075, China)

Abstract: The casing heater, besides maintaining the stability of the well wall, can also heat wellbore formation to prevent the generation of secondary hydrates in the well during the gas hydrate production process. In order to analyze the influence of daily water production, gas-water ratio and heating power on the temperature distribution in the surrounding formation during the gas hydrate production process, the heating process was simulated by COMSOL Multiphysics. The simulation results show that the effect of water production rate on the heating effect is obviously greater than the heating power; while the heating power mainly affects the temperature of the near-well formation, and the gas-water ratio mainly affects the heating radius. The numerical simulation is used to analyze and evaluate the heating effect of the casing heater, which provides guide for the economical and efficient production of natural gas hydrate.

Key words: casing heater; heating power; secondary hydrate; daily water production; gas-water ratio; numerical simulation

收稿日期:2018-11-06; 修回日期:2019-04-12 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.06.001

基金项目:中国地质调查局项目(编号:DD20190232)

作者简介:康家浩,男,汉族,1995年生,硕士研究生在读,地质工程专业,主要从事天然气水合物钻采技术研究工作,吉林省长春市西民主大街938号,1272363652@qq.com。

引用格式:康家浩,郭威,陆程,等.水合物开采过程中影响套管式加热器对井周地层加热效果的数值模拟[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(6):1-7.

KANG Jiahao, GUO Wei, LU Cheng, et al. Numerical simulation of heating process of casing heater in natural gas hydrate production wells[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(6):1-7.

0 引言

天然气水合物是一种由天然气(以甲烷为主)分子与水分子组成的具有笼型结构的似冰雪状的结晶化合物,广泛分布于海洋沉积物以及永久冻土带^[1-4],由于其储量大^[5-7]、能量密度大且无污染^[8],被认为是21世纪燃料资源的希望之一^[9-10]。随着越来越多天然气水合物藏的发现,各国都在积极对其进行研究以及试采,以期早日进行商业化开采。中国相继在海域和陆域发现了天然气水合物,并于2017年在神狐海域采用降压法成功进行了海域天然气水合物试采^[11-16]。

降压法,因简单易行,开采成本低,被认为是最有前景的天然气水合物开采方法^[17]。然而,降压开采过程中,在水合物分解吸热与焦耳—汤姆逊效应共同影响下,近井段可能会再次生成水合物^[18-20]。二次水合物会堵塞流体运移通道,进而影响天然气水合物的产量。为解决井周水合物二次形成这一问题,本文采用套管式加热器代替常规套管对水合物开采段井周地层进行加热^[21],运用COMSOL Multiphysics软件对加热过程进行模拟,以分析日产水量、气水比和套管式加热器加热功率对井周地层温度分布的影响。

1 数值模拟

1.1 计算模型

2007年4—6月,中国地质调查局广州海洋地质调查局在我国南海神狐海域完成了8个站位的钻探、测井,并在其中3个站位(SH2,SH3和SH7)获得了天然气水合物样品,3个站位的海水深度分别为1235、1245、1108 m,水合物层距海底深度115~

229 m,水合物层厚度分别为43、10、22 m,依据神狐海域的钻探数据^[22],本文建立三维圆柱体模型,如图1所示。由于加热器的加热范围较小,为便于计算,模拟储层半径为5 m,开采井位于圆柱体的中心位置,开采井半径 r_w 为0.06985 m。物理模型分为3层:天然气水合物层厚30 m,上覆地层与下伏地层厚度均为10 m。由于套管式加热器壁厚相对较小,在模型中忽略了其厚度。

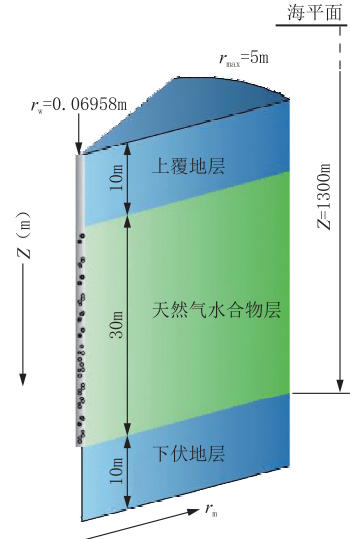


图1 地层物理模型

Fig.1 Stratigraphic physical model

1.2 地层参数选择

由文献^[23-24]可知,神狐海域含水合物沉积物主要为泥质粉砂。假设开采过程中地层流体为气液两相流(水和甲烷),不同气水比下的两相流体比热容和导热系数可分别根据式(1)和式(2)计算^[25]。泥质粉砂沉积物和两相流体物理参数详见表1。

表1 地层材料参数

Table 1 Formation material parameters

材 料	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙率 P	渗透率 k / m^2	导热系数 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	比热容 $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
泥质粉砂沉积物	2600	0.34	3.45×10^{-15}	2	2400
流体气水比为100	240.6137			0.1097335	2789.5589
流体气水比为500	73.5809			0.0493438	2523.2900
流体气水比为1000	47.5600			0.0399370	2481.8147

$$c_f = c_l f_l + c_g f_g + c_s f_s \quad (1)$$

式中: c_f ——泡沫的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; c_l ——液相的比热容,取 $4040 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; c_g ——气相的比热容,取 $2438 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; c_s ——表面活性剂的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; f_l 、 f_g 、 f_s ——液相、气相和表面活

性剂各组分的体积含量。

$$\lambda_f = 2/3 \cdot \lambda_l \phi + \lambda_g (1 - \phi) \quad (2)$$

式中: λ_f ——泡沫的热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; λ_l ——液相的导热系数,取 $0.59 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; λ_g ——气相的导热系数,取 $0.03 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ϕ ——泡沫中液

相的充满度。

1.3 物理场设置

在 COMSOL 软件中,选择传热模块中的多孔介质传热和流体流动模块中的达西定律在模型中增加物理场并进行耦合。在多孔介质传热中设定初始温度为 $14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,初始压力为 13.8 MPa ^[26],以及边界热源 P 等相关参数;在达西定律物理场中设定开采井半径 r_w 为 0.06985 m ,以及井中流体的质量流量 M_0 (根据日产水量和汽水比算出)等参数。本文选取了不同的日产水量 Q (10 、 50 、 $100\text{ m}^3/\text{d}$)、汽水比 n (100 、 500 、 1000)和加热功率 P (50 、 75 、 100 kW)共进行了 27 种不同工况下的模拟。

1.4 网格划分

本文主要分析套管式加热器在不同工况下对近井段地层加热效果,对开采井和储层分别进行了较细化和细化的四面体网格划分,共划分了 139452 个域单元。模型网格划分的横截面如图 2 所示,从图 2 可以看出近井段的网格划分的较密,其余部分网格随模型半径的增大而逐渐增大。

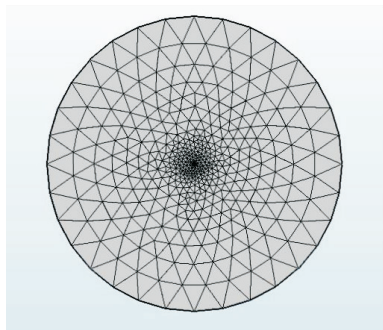


图 2 模型网格划分截面图

Fig.2 Cross section of model grid division

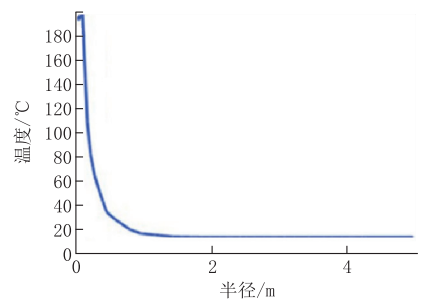
1.5 模型求解与后处理

设定时间单位以及时间步等参数,对模型进行瞬态分析,经求解与后处理,可得套管式加热器加热 10 d 后地层中温度场分布。当加热功率 P 为 50 kW ,汽水比为 100 ,日产水量为 10 m^3 时,地层温度分布如图 3 所示。

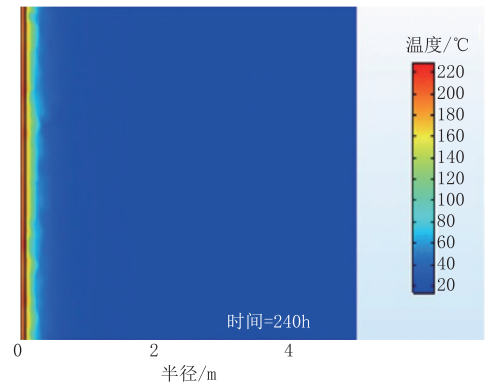
由图 3 可知,温度最大值分布在井壁处,为 $197.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。地层温度随地层半径 r ($r > r_w$)的曲线变化可分为 3 个阶段,即快速下降($r_w \sim 0.3\text{ m}$)、缓慢下降($0.3 \sim 1.2\text{ m}$)和趋于平衡($1.2 \sim 1.7\text{ m}$)。

2 数值计算结果与讨论

2.1 日产水量对套管式加热器加热效果的影响



(a) 地层温度随半径变化曲线



(b) 地层温度云图

图 3 地层温度随半径变化曲线图(a)与地层温度云图(b)

Fig.3 Formation temperature vs radius curve(a) and formation temperature nephogram(b)

在加热功率 P 分别为 50 、 100 kW ,汽水比 n 分别为 100 、 500 的条件下,研究不同的日产水量对套管式加热器加热效果的影响。图 4 给出了在 4 种不同的条件下,日产水量 Q 分别为 10 、 50 和 $100\text{ m}^3/\text{d}$ 时,地层温度随半径的变化,并用坐标标记了不同工况下井壁的温度(下同)。从模拟结果可知,在 4 种不同的条件下,日产水量对套管式加热器的加热效果影响规律基本一致。在距开采井较近范围内,地层温度随半径的增加而急剧降低,出现这种现象的原因是随着半径的减小,地层中流体的流速显著增加,由于流体带走了大部分热量,因此,近井段的温度变化很大。当日产水量逐渐增加时,套管式加热器加热影响半径急剧下降,加热效果迅速降低,特别是在产水量低的情况下,这种影响尤为显著。

2.2 气水比对套管式加热器加热效果的影响

在加热功率 P 分别为 50 、 100 kW ,开采井日产水量分别为 10 、 $50\text{ m}^3/\text{d}$ 的条件下,研究不同的气水比对套管式加热器加热效果的影响。图 5 给出了在 4 种不同的条件下,气水比分别为 100 、 500 和 1000 时,地层温度随半径的变化。从模拟结果可知,4 种条件下气水比对套管式加热器加热效果的影响主要

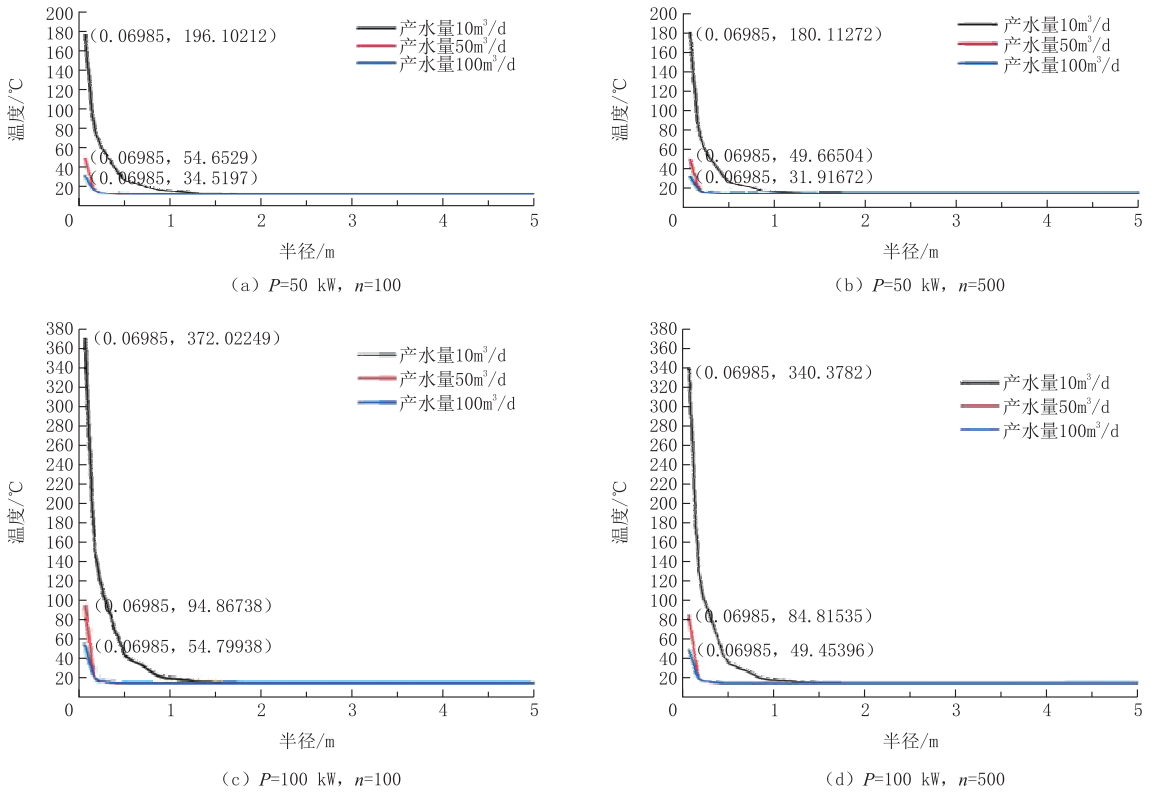


图4 不同产水量下地层温度随半径的变化

Fig.4 Formation temperature vs radius under different water yields

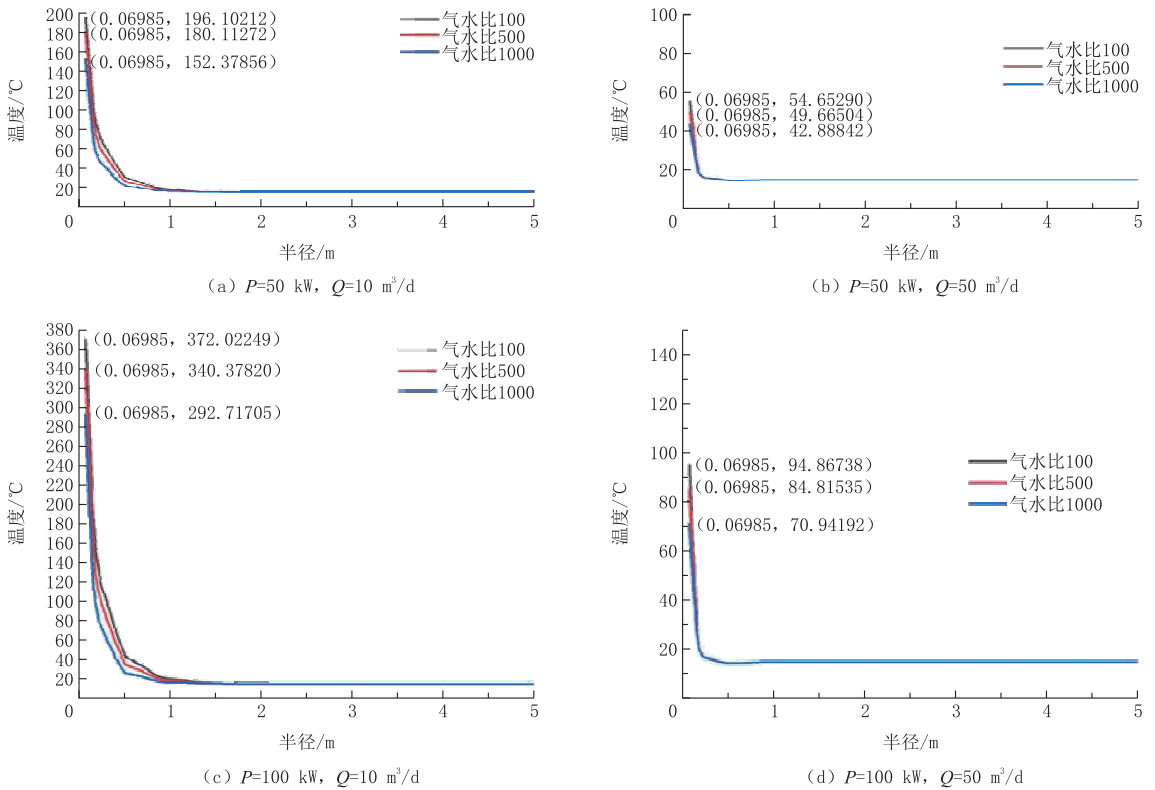


图5 不同气水比下地层温度随半径的变化

Fig.5 Formation temperature vs radius under different gas-water ratios

发生在井壁附近,且当日产水量较低时,气水比的影响越大,由于在产水量较低的情况下,气体相较于水带走的热量占比增加,故气水比在日产水量较低的情况下影响越大。

在套管式加热器的加热范围内,由于温度的增加而使二次水合物形成的条件更加苛刻(即需要更高的压力),有效预防了二次水合物的生成。表 2 给出了在图 5(a)条件下($P=50\text{ kW}, Q=10\text{ m}^3/\text{d}$),不同气水比下套管式加热器对地层的加热范围,由

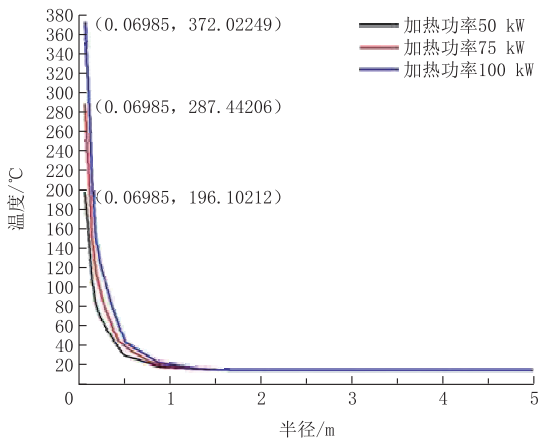
表 2 不同气水比下套管式加热器对地层的加热范围
Table 2 Heating range of casing heater in formation under different gas-water ratios

气水比 n	加热半径 r/m
100	1.73
500	1.69
1000	1.62

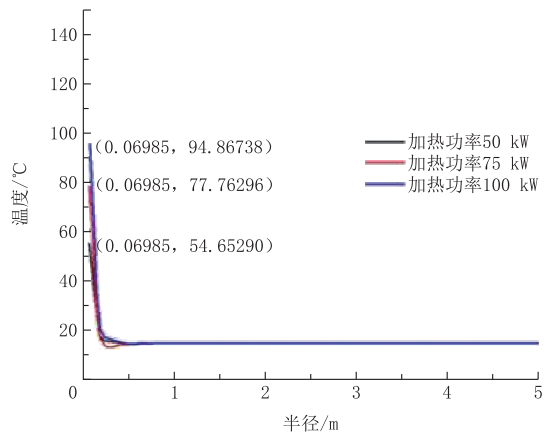
表中数据可知,在日产水量和加热功率一定的条件下,套管式加热器对地层的加热半径随气水比的增加而减小。

2.3 加热功率对套管式加热器加热效果的影响

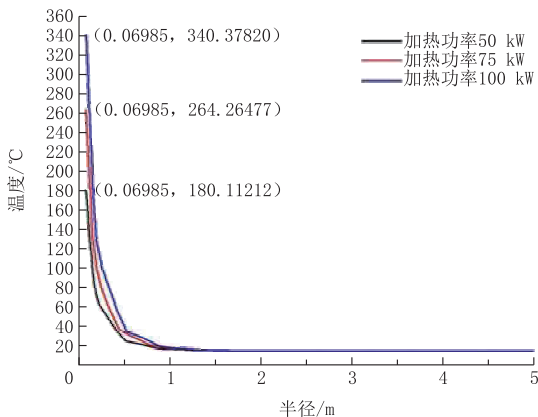
在气水比分别为 100、500,开采井日产水量分别为 $10、50\text{ m}^3/\text{d}$ 的条件下。研究不同加热功率对套管式加热器加热效果的影响。图 6 中的 4 个曲线图分别是在不同条件下,加热功率分别为 50、75 和 100 kW 时地层温度随半径的变化,从图中可以看出地层增加的温度在井壁附近几乎正比于加热功率,且随着半径的增加而急剧下降;加热器对地层的加热半径随加热功率的增大而略微增大,因此,加热器的加热功率主要影响加热半径内地层的温度,如在图 6(c)条件下($n=500, Q=10\text{ m}^3/\text{d}$)加热半径分别为 1.69、1.76、1.81 m。



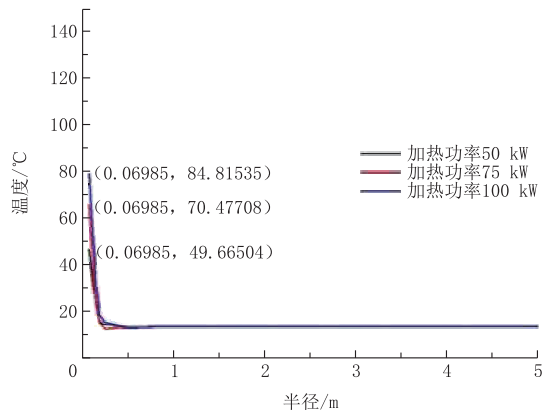
(a) $n=100, Q=10\text{ m}^3/\text{d}$



(b) $n=100, Q=50\text{ m}^3/\text{d}$



(c) $n=500, Q=10\text{ m}^3/\text{d}$



(d) $n=500, Q=50\text{ m}^3/\text{d}$

图 6 不同加热功率下地层温度随半径的变化

Fig.6 Formation temperature vs radius under different heating powers

结合数值模拟的结果,我们可以粗略得出在气水比 n 为 500,日产水量为 $10 \text{ m}^3/\text{d}$ 的条件下,套管式加热器对于地层加热影响范围与加热功率之间的关系(见图 7)。

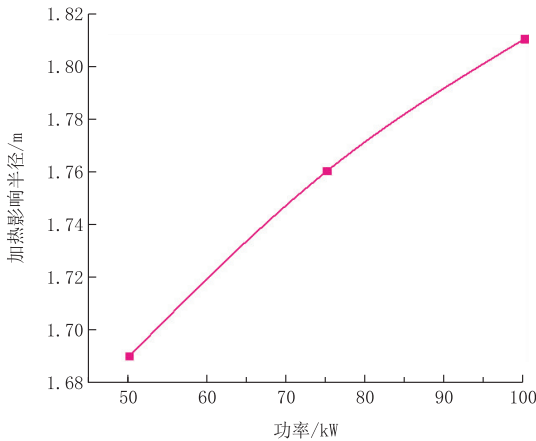


图 7 加热影响半径随加热功率的变化

Fig.7 Heating influence radius vs heating power

由图 7 可知,在气水比为 500,日产水量为 $10 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工况下,使套管式加热器对地层加热的影响半径为 1.8 m 时,所需要的加热功率为 92 kW。

3 结论

利用数值模拟的方法,建立了套管式加热器加热天然气水合物储层的模型,通过控制变量法模拟和分析了日产水量、气水比和加热功率对套管式加热器加热效果的影响,得到了以下结论:

(1)日产水量对套管式加热器加热效果的影响体现在地层温度和加热半径 2 个方面。随着日产水量的增加,加热器对地层的加热效果明显降低,地层温度的增量减小,加热器对地层的加热半径缩小。

(2)在日产水量一定的条件下,气水比对套管式加热器加热效果的影响不大。

(3)加热功率对套管式加热器加热效果的影响体现在地层温度,尤其影响近井段地层的温度。

(4)通过数值模拟计算,对于特定工况(气水比为 500,日产水量为 $10 \text{ m}^3/\text{d}$)下,套管式加热器的加热功率为 92 kW 时,可避免距生产井 1.8 m 范围内二次水合物的形成。

参考文献(References):

[1] Alexei V. Milkov. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there[J]. *Earth Science Reviews*, 2003,66(3):183-197.

[2] Englezos P. Clathrate hydrates[J]. *Ind Eng Chem Res*, 1993, 32(7):1251-1274.

[3] Sloan E D. Clathrate hydrates of natural gases[M]. New York: Marcel Dekker, 1998:18-28.

[4] Koh C A. Towards a fundamental understanding of natural gas hydrates[J]. *Chemical Society Reviews*, 2002,31:157-167.

[5] Yuri F. Makogon. Natural gas hydrates—A promising source of energy[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2010,2(1):49-59.

[6] Miller, J.J., Lee, M.W., Huene, R. An analysis of a seismic reflection from the base of a gas hydrate zone, offshore Peru [J]. *A. A. P. G. Bulletin*, 1991,75(5):910-924.

[7] 王宏语,纪云龙.认识一种新兴资源——天然气水合物[J].*资源·产业*,2005,(1):63-67.
WANG Hongyu, JI Yunlong. Know a kind of burgeoning resource—gas hydrates[J]. *Resources & Industries*, 2005,(1):63-67.

[8] Englezos Peter, Lee Judong. A cleaner source of energy[J]. Springer-Verlag, 2005, 22(5):671-681.

[9] 宣之强,李钟模,吴必豪,等.天然气水合物新能源简介——对全球试采、开发和研究天然气水合物现状的综述[J].*化工矿产地质*,2018,40(1):48-52.
XUAN Zhiqiang, LI Zhongmo, WU Bihao, et al. Introduction to new energy gas hydrate—a review on global pilot production, development and research status of gas hydrate[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 2018,40(1):48-52.

[10] Makogon Y.F., Holditch S.A., Makogon T.Y.. Natural gas hydrates—A potential energy source[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007,56(1):14-31.

[11] 于德福,陈惠玲.南海深处的冰与火[N].*中国国土资源报*, 2017-05-22.
YU Defu, CHEN Huiling. Ice and fire in the deep South China Sea[N]. *The Chinese Newspaper of Land and Resources*, 2017-05-22.

[12] 陈玉凤,梁德青,吴能友.南海神狐海域水合物对岩心电阻率的影响[J].*石油地球物理勘探*,2018,53(6):1241-1246,1113-1114.
CHEN Yufeng, LIANG Deqing, WU Nengyou. Resistivity characteristics of core samples containing natural gas hydrates in Shenhu Area, the South China Sea[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(6):1241-1246,1113-1114.

[13] 万义钊,吴能友,胡高伟,等.南海神狐海域天然气水合物降压开采过程中储层的稳定性[J].*天然气工业*,2018,38(4):117-128.
WAN Yizhao, WU Nengyou, HU Gaowei, et al. Reservoir stability in the process of natural gas hydrate production by depressurization in the Shenhu area of the South China Sea [J]. *Natural Gas Industry*, 2018,38(4):117-128.

[14] 吴时国,王吉亮.南海神狐海域天然气水合物试采成功后的思考[J].*科学通报*,2018,63(1):2-8.
WU Shiguo, WANG Jiliang. On the China's successful gas production test from marine gas hydrate reservoirs[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018,63(1):2-8.

[15] 丁蟠峰,杨富祥,程遥遥.可燃冰的研究现状与前景[J].*当代化工*,2019,48(4):815-818.

- DING Panfeng, YANG Fuxiang, CHENG Yaoyao. Research status and prospect of gas hydrates[J]. Contemporary Chemical Industry, 2019, 48(4): 815-818.
- [16] 肖莹莹, 左力艳, 张诚. 天然气水合物研究与开发试验概述[J]. 内蒙古石油化工, 2018, 44(10): 18-22.
- XIAO Yingying, ZUO Liyan, ZHANG Cheng. An overview of international gas hydrate research and trial production[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2018, 44(10): 18-22.
- [17] Konno Yoshihiro, Masuda Yoshihiro, Hariguchi Yosuke. Key factors for depressurization-Induced gas production from oceanic methane hydrates[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(3): 1736-1744.
- [18] Zheng Su, George J. Moridis, Keni Zhang. A huff-and-puff production of gas hydrate deposits in Shenhu Area of South China Sea[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 86-87: 54-61.
- [19] Seol Yongkoo, Myshakin Evgeniy. Experimental and numerical observations of hydrate reformation[J]. Energy & Fuels, 2011, 25(3): 1099-1110.
- [20] George-J. Moridis, Matthew T. Reagan. Estimating the upper limit of gas production from class 2 hydrate accumulations in the permafrost: 2. Alternative well designs and sensitivity analysis[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 76(3): 124-137.
- [21] 孙友宏, 李冰, 贾瑞, 等. 一种利用套管式加热器开采天然气水合物的方法, 中国; CN108505977A[P]. 2018-09-07.
- SUN Youhong, LI Bing, JIA Rui, et al. A method of exploiting natural gas hydrate by casing heater, China; CN108505977A[P]. 2018-09-07.
- [22] 李刚, 李小森, 陈琦, 等. 南海神狐海域天然气水合物开采数值模拟[J]. 化学学报, 2010, 68(11): 1083-1092.
- LI Gang, LI Xiaosen, CHEN Qi, et al. Numerical simulation of gas production from gas hydrate zone in Shenhu Area, South China Sea[J]. Acta Chimica Sinica, 2010, 68(11): 1083-1092.
- [23] 李彦龙. 我国海域天然气水合物试开采圆满完成并取得历史性突破[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(5): 34.
- LI Yanlong. Successful completion and historic breakthrough of natural gas hydrate trial production in China's offshore areas[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(5): 34.
- [24] 曹运诚. 南海神狐海域天然气水合物顶界计算—沉积物粒度影响[C]//中国地球物理学会、中国地震学会、全国岩石学与地球动力学研讨会组委会、中国地质学会构造地质学与地球动力学专业委员会、中国地质学会区域地质与成矿专业委员会. 2017 中国地球科学联合学术年会论文集(二十八)——专题 56, 海洋地球物理, 2017.
- CAO Yuncheng. Natural gas hydrate in Shenhu Area of top-calculation of sediment grain size effect [C]//China Geophysical Society, China Seismological Society, Organizing Committee of National Symposium on Petrology and Geodynamics, Specialized Committee of Structural Geology and Geodynamics of China Geological Society, Regional Geology and Mineralization Committee of China Geological Society. Papers Collection of 2017 China Geosciences Joint Academic Annual Meeting (28)—Theme 56: Marine Geophysics, 2017.
- [25] 刘华南. 冻土层钻探低温泡沫冲洗液的研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2016.
- LIU Huanan. Research on low temperature foam flushing fluid used in frozen soil layer drilling[D]. Changchun Jilin: Jilin University, 2016.
- [26] 李刚, 李小森, Keni Zhang, 等. 水平井开采南海神狐海域天然气水合物数值模拟[J]. 地球物理学报, 2011, 54(9): 2325-2337.
- LI Gang, LI Xiaosen, Keni Zhang, et al. Numerical simulation of gas production from hydrate accumulations using a single horizontal well in Shenhu Area, South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(9): 2325-2337.

(编辑 韩丽丽)