

万庭辉, 李占钊, AVIS John, 等. 天然气水合物开采数值模拟中基于 mVIEW 的水平井井眼轨迹建模[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(8): 74-80.

天然气水合物开采数值模拟中基于 mVIEW 的水平井井眼轨迹建模

万庭辉^{1,2}, 李占钊^{1*}, AVIS John³, 王静丽¹, 陆程⁴, 马超¹, 李柯良¹

(1 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760; 2 东北石油大学, 黑龙江大庆 163318;

3 Geofirma Engineering Ltd, Ottawa, K1R 1A2; 4 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029)

摘要:针对使用 TOUGH+HYDRATE 模拟水平井降压开采天然气水合物过程中井眼轨迹的精细刻画给出解决方案, 利用 mVIEW 进行水平井井眼轨迹建模, 并进行了模型验证, 弥补了模拟器在复杂建模方面的不足, 提高模拟器使用效率。由于含井眼轨迹的水平开采模型生产井段在 Z 方向穿透层位更接近真实的生产情况, 因此, 含井眼轨迹的水平井开采模型能更好地指导实际生产。

关键词:天然气水合物; mVIEW; 水平井; 井眼轨迹; 数值模拟; TOUGH+HYDRATE

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2019.190

0 引言

天然气水合物是一种极具发展潜力的清洁能源。天然气水合物广泛存在于冻土地带和海洋地层。目前, 全球的天然气水合物总碳含量远超传统矿物石油、煤、天然气中的总碳含量^[1-8]。美国劳伦斯伯克利国家重点实验室 Moridis 开发的 TOUGH+HYDRATE 水合物藏开采数值模拟软件可考虑四相(气、液、冰、水合物)、四组分(水合物、水、甲烷、盐等水溶性抑制剂)以及拟组分的热焓, 各组分存在于各相中^[9]。可模拟复杂地质体中水合物储层的非等温反应、相平衡以及流体和热的流动, 包括降压、注热、加入抑制剂等^[10-11]。近年来, 相关研究人员利用该软件进行了大量数值模拟工作, 有研究表明, 对于 Class2 和 Class3 型水合物藏, 利用水

平井可以显著提高产气速率^[12-14]。

目前, 垂直井模拟开采水合物藏一般采用(R, Z)坐标系, 最中心网格直径设置成与井筒直径相当, 然后将该网格岩性设置成与井筒相近的属性, 用来模拟垂直井开采时的井筒流动^[12-13, 15-16]。水平井开采水合物藏也是通过规则网格剖分, 在水平井的相应位置剖分出与水平井井筒直径相当的网格, 与垂直井相同也是通过将该网格岩性设置成与井筒相近的属性, 用来模拟水平井开采时的井筒流动, 但是该种水平井井型只能平行于某一坐标轴, 在处理含隔夹层等非均质储层的产能模拟时显得尤为不足^[14, 17-20]。

由于网格剖分方式直接影响模型精确程度、计算复杂程度和模拟可靠程度, 在进行含隔夹层等非均质储层的产能模拟工作时, 含井眼轨迹的水平井可穿越并动用更多的小层, 最大限度接近场地实际情况, 得到较为准确的模拟结果, 因此, 在使用 TOUGH+HYDRATE 进行水平井降压开采数值模拟过程中, 有必要引入 mVIEW 对井眼轨迹进行精细刻画。

1 简单水平井开采模型

为方便用户进行网格设计, TOUGH+HYDRATE 模拟软件自带 MeshMaker 网格剖分器, 该剖分器对

收稿日期: 2019-10-08

资助项目: 广东省促进经济高质量发展专项资金海洋经济发展项目(GDOE(2019)A39)

作者简介: 万庭辉(1990—), 男, 在读硕士, 工程师, 主要从事天然气水合物数值模拟方面的研究工作.E-mail: 825848651@qq.com

* 通讯作者: 李占钊(1987—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事天然气水合物数值模拟方面的研究工作. E-mail: 490565409@qq.com

于规则边界和等厚的地质模型具有很好的适用性,但对于不规则边界和复杂的变厚度问题,例如井眼轨迹设计,该剖分器无能为力。

图 1 为典型的 MeshMaker 剖分水平井开采模型示意图,模拟区域为 $680\text{ m} \times 510\text{ m}$ 的地质体,以笛卡尔坐标系进行网格离散划分。 x 方向上将模拟区域分为 25 个网格, y 方向上将模拟区域分为 28

个网格, z 方向上将模拟区域分为 70 个网格,整个模拟区域被划分成 $25 \times 28 \times 70 = 49\ 000$ 个网格。可以发现网格划分为非结构网格,水合物层和井周附近网格进行了加密处理。天然气水合物开采过程中,水合物分解主要发生在水合物层和井口附近区域,这两部分网格较密,有利于观察系统内温度、压力、水合物相、气相、水相等模块的时空变化规律。

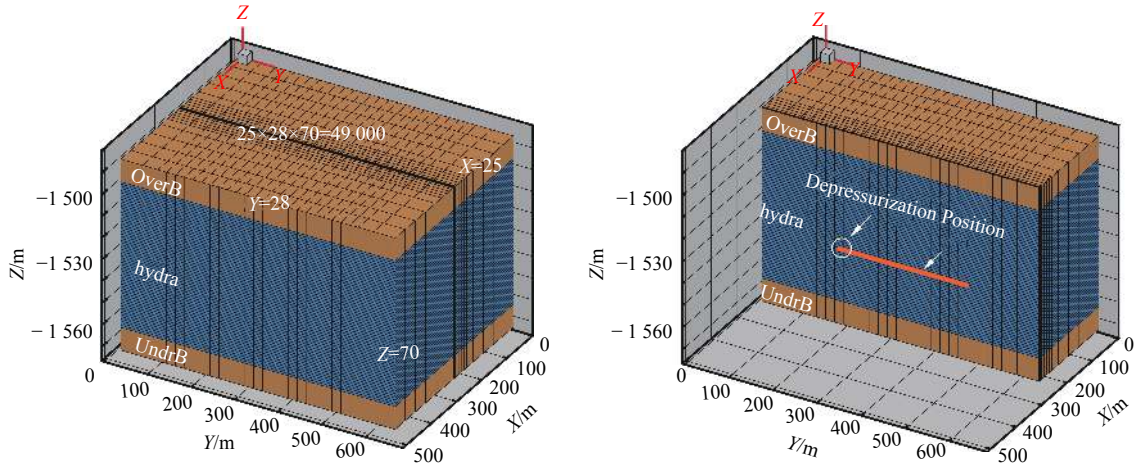


图 1 水平井开采模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of horizontal production well

2 基于 mVIEW 的井眼轨迹建模

mVIEW 是一款由 Geofirma 公司开发的商业化数值模拟支持系统,包括数据分析和复杂地质数据可视化等功能,内置支持 TOUGH+HYDRATE、MODFLOW 等数值模型的前后处理和可视化操作界面,具有灵活的网格剖分方式和网格加密方法,软件界面如图 2 所示。此前有研究人员将 mVIEW 和 TOUGH+HYDRATE 结合进行水合物藏水平井开采模拟^[14, 17-19],但其水平井井型均为平行于某一坐标轴的简单水平井,为实现含井眼轨迹的水平井模型网格剖分,mVIEW 开发人员对软件进行了升级,开发了相应模块。

2.1 建模流程

为实现井眼轨迹建模,mVIEW 在最新版本软件中开发了 Create 3D Layer for Single Well Geometry (图 3)和 Connect 3D Well Geometry to Geology 模块(图 4),允许生成任意 TOUGH+HYDRATE 格式的井眼轨迹网格。首先假设套管井与地层之间除

了指定连接位置以外不存在流动,井眼轨迹最初被描述为一系列的点或坐标,随后可将点或坐标转换为单层 3D 几何体。生成井眼轨迹网格后将其与地质网格结合,最后设置网格属性。Create 3D Layer for Single Well Geometry 模块的输入信息包括井的坐标、默认平面方向、半径和 ID 等。

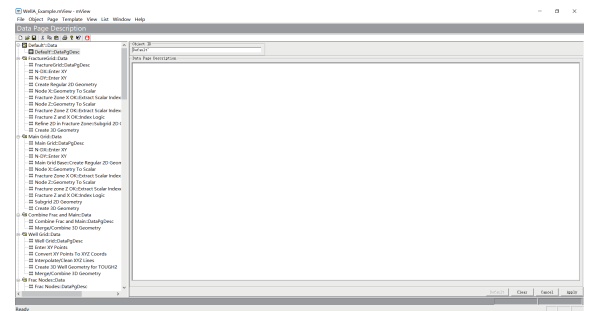


图 2 mVIEW 软件界面

Fig.2 mVIEW software interface

创建完地质体网格,就可使用现有的 Combine 3D Geometries 模块将井添加至地质体网格中。整个模型创建最后一步是使用模块设置井与地质体网格之间的连接,输入信息包括井与地质体网格之间的连接面积、连接长度等。



图3 Create 3D Layer for Single Well Geometry 模块

Fig.3 Create 3D Layer for Single Well Geometry object

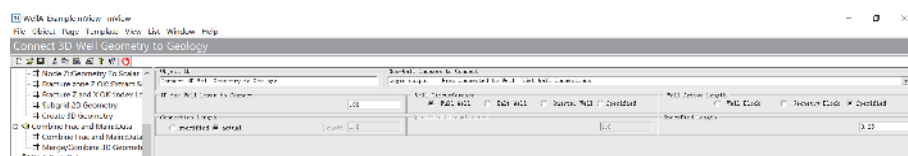


图4 Connect 3D Well Geometry to Geology 模块

Fig.4 Connect 3D Well Geometry to Geology object

2.2 模型创建

天然气水合物开采过程中,水合物分解主要发生在完井区域,为了更好地观察该区域温度压力、水合物饱和度等物性时空变化规律,对该区域进行了网格加密处理。

模型网格数量越少,计算速度越快,为了尽量减少网格数量,整个地质体网格由地质体网格 A 和地质体网格 B 两部分结合而成,地质体网格 A 完井区域网格较密,地质体网格 B 完井区域网格较疏。组合后的地质体网格如图 5 所示。

(1) STEP01 生成井眼轨迹网格

井眼轨迹网格由 XYZ 坐标点定义,使用 mVIEW 的 Interpolate/Clean XYZ Lines 模块对输入的 XYZ 坐标按指定网格长度进行内插,得到一系列的井眼

轨迹坐标点。然后使用 Create 3D Layer for Single Well Geometry 模块,将井眼轨迹坐标点转换为 3D 单井网格层。选取井眼轨迹某部分网格进行放大,井眼轨迹网格及其连接如图 6 所示。

(2) STEP02 井眼轨迹网格与地质体网格连接

井眼轨迹网格和地质体网格连接有 3 个步骤:第 1 步是用 Combine 3D Geometries 模块将井眼轨迹网格和地质体网格相结合;第 2 步是通过指定坐标转换成索引以确定哪些井眼轨迹网格与地质体网格相连,哪些地质体网格为裂缝网格;第 3 步是用 Connect 3D Well Geometry to Geology 模块,设置井与地质体网格之间的连接,输入信息包括井与地质体网格之间的连接面积、连接长度等。从井到地质体的连接如图 7、8 所示。

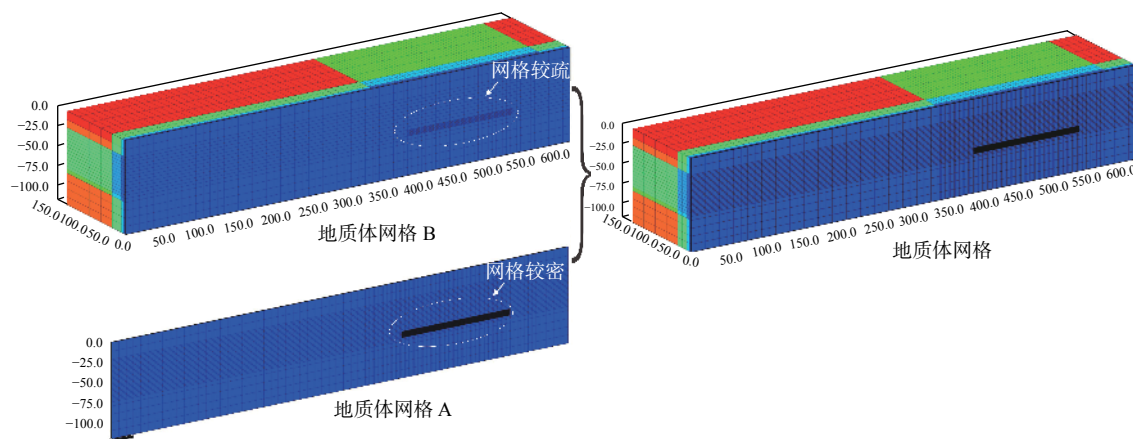


图5 地质体网格

Fig.5 Geometry grid

(3) STEP03 设置岩性

通过创建岩性,定义岩性类型,然后将岩性类

型分配给网格中的所有节点来定义岩性集。对于模型示例,假设单相注水,定义没有毛细压力和相

对渗透率特性, 为每种地质类型、裂缝和井定义岩性(图 9), 最后得到模型网格(图 10)。

2.3 模型验证

对于模型示例, 在井的顶部设置恒定注水(图 10 中的 GENER 节点)并创建 GENER 源汇输出块。为

具有静水压力曲线的完全水饱和系统创建初始状态 INCON 文件。通过注水来确认井眼轨迹网格和地质体网格耦合的正确性。根据液体密度, 孔隙率和块体积计算地质体网格中流体质量变化。测试结果显示注入流体质量与地质体质量增加之间存在 1:1 匹配(图 11)。

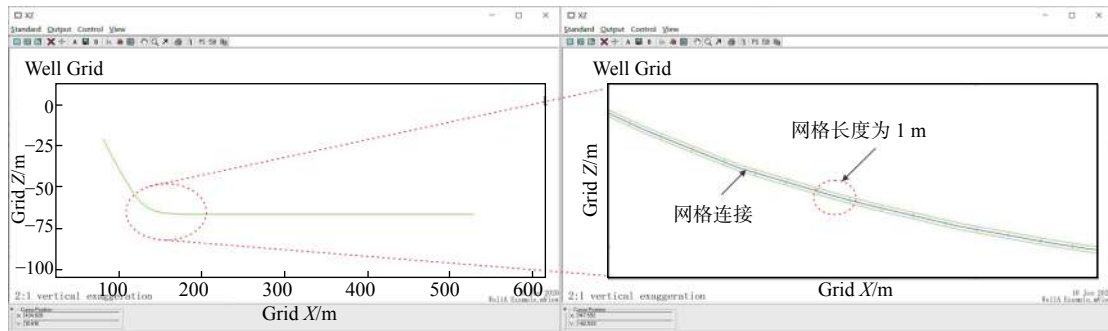


图 6 井眼轨迹网格及其连接

Fig.6 Wellbore trajectory grid and connection

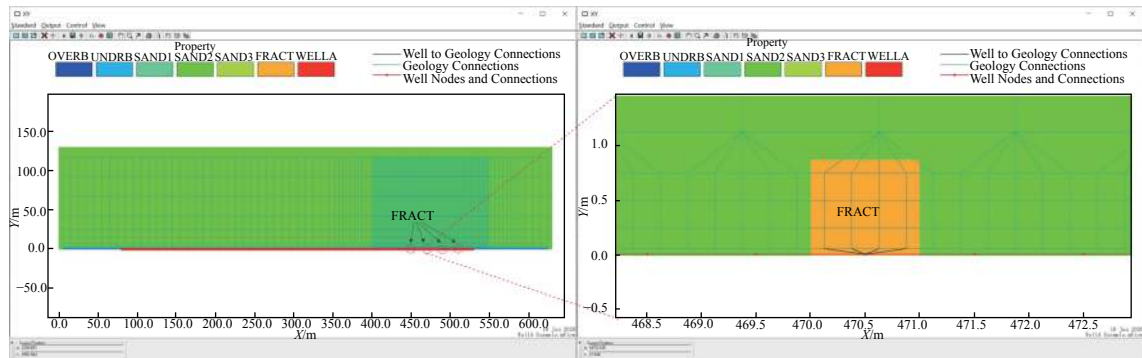


图 7 井眼轨迹网格与地质体网格的连接 (XY 平面)

Fig.7 Connection of wellbore trajectory grid and geometry grid(XY plane)

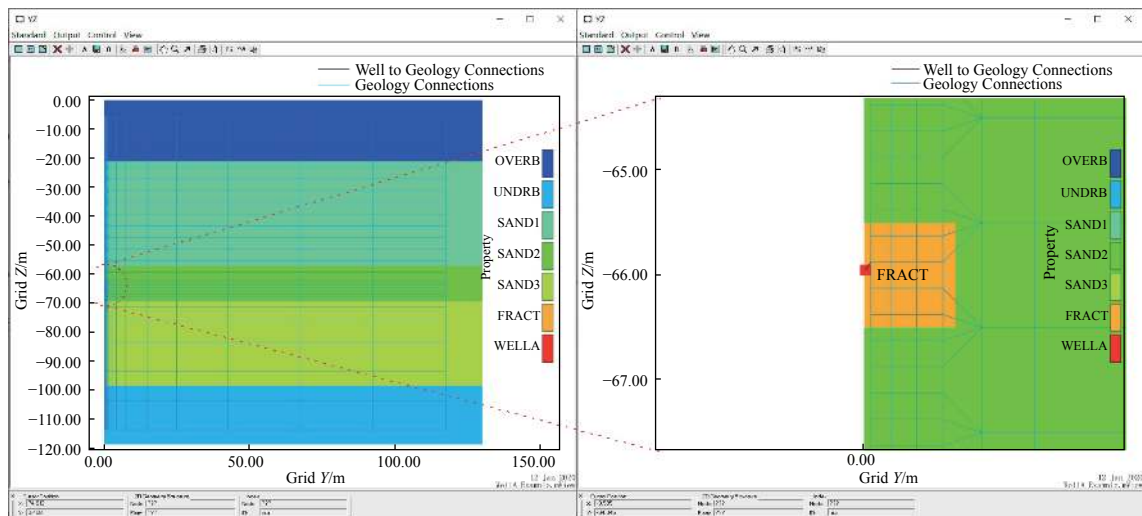


图 8 井眼轨迹网格与地质体网格的连接 (YZ 平面)

Fig.8 Connection of wellbore trajectory grid and geometry grid(YZ plane)

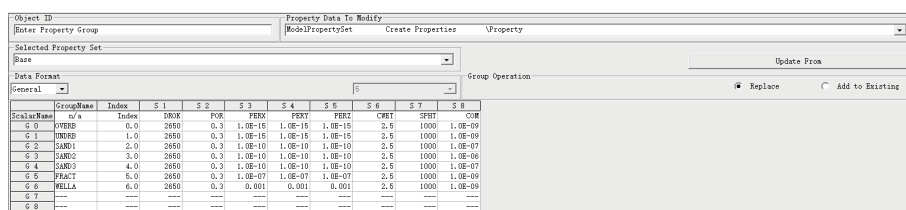


图 9 设置岩性

Fig.9 Setting lithology

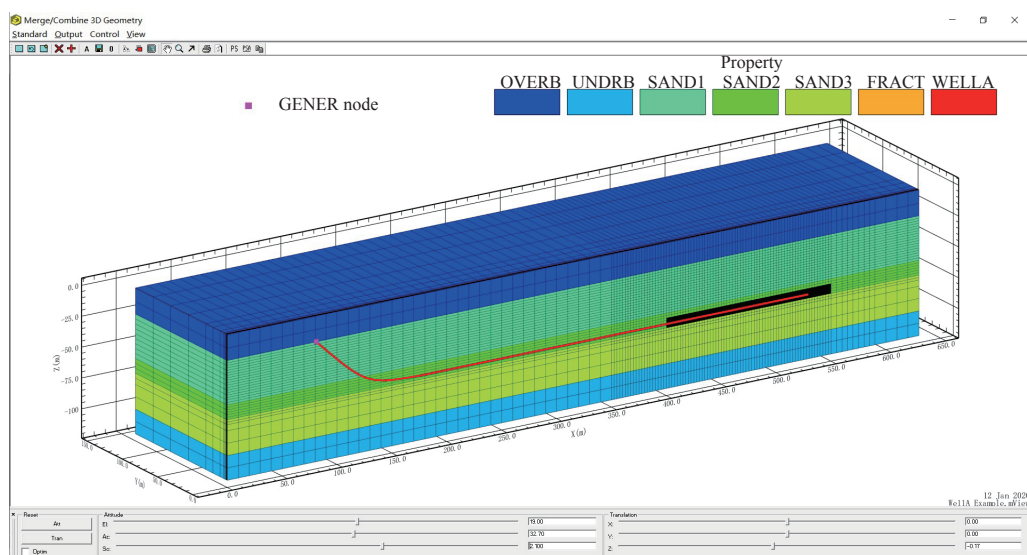


图 10 模型网格

Fig.10 Model grid

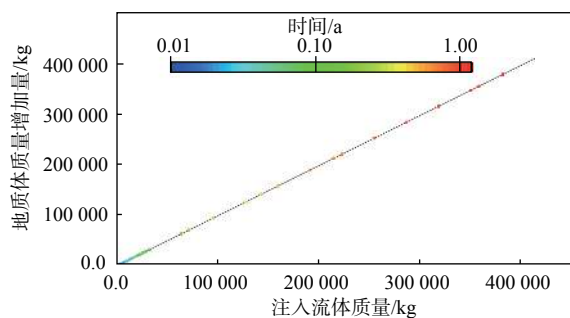


图 11 注水测试结果

Fig.11 Water injection test results

3 讨论

基于 mVIEW 的水平井井眼轨迹建模流程,对模型进行了验证。相较于简单水平井开采模型,为研究含井眼轨迹水平井开采模型的优点,分别用 mVIEW 创建水平井开采理想模型 A 和含井眼轨迹水平井开采模型 B,如图 12 所示。

模型 A 和模型 B 具有相同的边界条件、初始条件,使用 mVIEW 网格赋值模块,给定 A、B 两个模型网格温度压力、饱和度等初始条件,井口压降均固定为 10 Mpa 开采 30 d,使用 TOUGH+HYDRATE 数值模拟器进行模拟。

使用 mVIEW 对模拟结果进行后处理,首先是调用 mVIEW 的 TECPLOTData 模块(图 13),然后结合建模时 mVIEW 生成的 mGEO 模型文件,对 TOUGH+HYDRATE 模拟器生成的 Plot_Data_Elem 文件进行读取并生成 mVIEW 可识别的 mDAT 文件,最后用 mVIEW 对模拟结果进行可视化。A、B 两个模型开采 30 d 后,温度和压力场分布如图 14 所示。

含井眼轨迹的水平井开采模型生产井段在 Z 方向穿透层位更接近真实的生产情况,能动用更多的小层,储层物性变化如温度和压力场图分布更接近真实情况,同时也能更精确的预测二次水合物的生成位置,因此,含井眼轨迹的水平井开采模型能更好的指导实际生产。

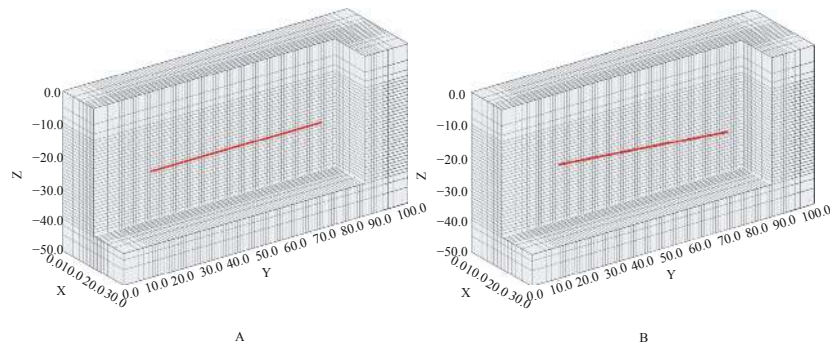


图 12 水平井开采理想模型 A 和含井眼轨迹水平井开采模型 B

Fig.12 Ideal model A for horizontal well exploitation and model B for horizontal well exploitation with wellbore trajectory



图 13 TECPLOTData 模块

Fig.13 TECPLOTData object

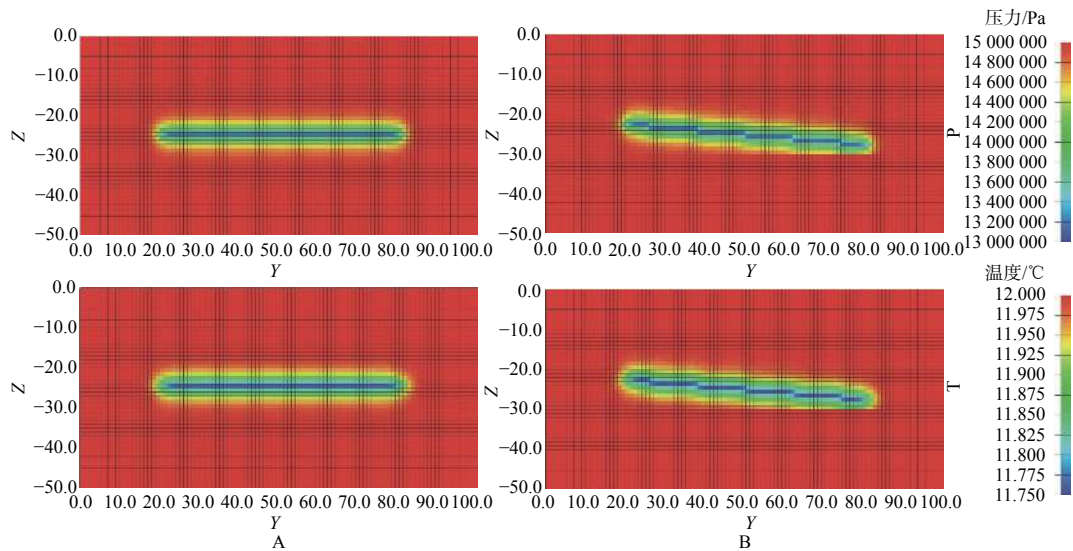


图 14 温度和压力场图

Fig.14 Temperature and pressure field diagram

4 结论

TOUGH+HYDRATE 模拟器作为强有力的天然气水合物模拟软件,困难的网格生成方法影响了模拟器在复杂建模方面的应用,针对水平井井眼轨迹精细建模提出模拟前后处理的解决方案,弥补该模拟器在复杂建模方面的不足,有效提高了模拟器的使用效率。分析了含井眼轨迹的水平井开采理想模型的优点,由于含井眼轨迹的水平开采模型生

产井段在 Z 方向穿透层位更接近真实的生产情况,因此,含井眼轨迹的水平井开采模型能更好的指导实际生产。相关研究人员可根据需要在地质体网格中设计井眼轨迹,开展含井眼轨迹的水平井降压开采天然气水合物数值模拟研究工作。

参考文献:

[1] Sloan E D, Koh C A. Clathrate hydrates of natural gases:3rd[M].Speight J G. Laramie Wyoming, 2008.
[2] Milkov A V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine

- sediments: how much is really out there?[J]. *Earth-Science Reviews*, 2004, 66(3/4): 183-197.
- [3] Klauda J B, Sandler S I. Global distribution of methane hydrate in ocean sediment[J]. *Energy Fuels*, 2005, 19(2): 459-470.
- [4] Lee S Y, Holder G D. Methane hydrate potential as a future energy source[J]. *Fuel Processing Technology*, 2001, 71(1-3): 181-186.
- [5] Collett T S. Gas hydrate as a future energy resource[J]. *Geotimes*, 2004, 49(11): 24-27.
- [6] Reagan M T, Kowalsky M B, Moridis G J, et al. The effect of reservoir heterogeneity on gas production from hydrate accumulations in the permafrost[J]. *Physics Letters A*, 2010, 90: 33-36.
- [7] Moridis G J, Reagan M T. Estimating the upper limit of gas production from Class 2 hydrate accumulations in the permafrost: 1. Concepts, system description, and the production base case[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011a, 76: 194-204.
- [8] Li X, Xu C, Zhang Y, et al. Investigation into gas production from natural gas hydrate: A review[J]. *Applied Energy*, 2016, 172: 286-322.
- [9] Moridis G J, Kowalsky M B, Pruess K. TOUGH+HYDRATE v1.1 user's manual: A code for the simulation of system behavior in hydrate-bearing geologic media[M]. Berkeley, California, 2009.
- [10] Moridis G J. Numerical studies of gas production from Class 2 and Class 3 hydrate accumulations at the Mallik Site, Mackenzie Delta, Canada[J]. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 2004, 7(3): 175-183.
- [11] Moridis G J, Collett 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*, 2004, 43(3/4): 219-328.
- [12] 苏正, 吴能友, 张可霓. 南海北部陆坡神狐天然气水合物开发潜力[J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(6): 16-23.
- [13] 苏正, 何勇, 吴能友. 南海北部神狐海域天然气水合物热激发开采潜力的数值模拟分析[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(5): 74-82.
- [14] 李刚, 李小森, Zhang K N, 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.
- [15] 李小森, 陈琦, 李刚, 等. 海底水合物矿藏降压开采与甲烷气体扩散过程的数值模拟[J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 598-606.
- [16] 庞维新, 李清平, 孙福街, 等. 天然气水合物藏开采数值模拟研究[J]. *中国煤炭地质*, 2015, 27(8): 31-37.
- [17] 郭朝斌, 张可霓, 凌璐璐. 天然气水合物数值模拟方法及其应用[J]. *上海国土资源*, 2013, 34(2): 71-79.
- [18] Feng J C, Li X S, Li G, et al. Numerical investigation of hydrate dissociation performance in the South China Sea with different horizontal well configurations[J]. *Energies*, 2014, 7: 4813-4814.
- [19] Li X S, Yang B, Li G, et al. Numerical simulation of gas production from natural gas hydrate using a single horizontal well by depressurization in Qilian Mountain Permafrost[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51: 4424-4432.
- [20] Sun J X, Ning F L, Zhang L, et al. Numerical simulation on gas production from hydrate reservoir at the 1st offshore test site in the eastern Nankai Trough[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016(30): 64-76.

HORIZONTAL WELLBORE TRAJECTORY MODELING BASED ON mVIEW IN NUMERICAL SIMULATION OF NATURAL GAS HYDRATE PRODUCTION

WAN Tinghui^{1,2}, LI Zhanzhao^{1*}, AVIS John³, WANG Jingli¹, LU Cheng⁴, MA Chao¹, LI Keliang¹

(1 China Geological Survey, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China; 2 Northeast University of Petroleum,

Daqing 163318, Heilongjiang, China; 3 Geofirma Engineering Ltd, Ottawa, K1R 1A2, Canada;

4 Oil and Gas Survey Center of China Geological Survey, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper proposed a solution to the wellbore trajectory modeling in the process of using the TOUGH+HYDRATE to simulate the horizontal well depressurization of natural gas hydrate. The mVIEW is used to model the horizontal wellbore trajectory, and the model verification is carried out to make up the deficiencies of the simulator in complex modeling and improve the efficiency of the simulator. The horizontal well model with wellbore trajectory can better guide actual production because it is closer to the real production situation in the Z direction.

Key words: natural gas hydrate; mVIEW; horizontal well; borehole trajectory; numerical simulation; TOUGH+HYDRATE