

水合物储层水平井防砂砾石充填因素敏感性模拟研究

秦帆帆, 孙嘉鑫, 顾宇航, 曹鑫鑫, 游志刚, 宁伏龙
中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉, 430074

关键词: 水合物; 水平井; 砾石充填; TransAT; 防砂

天然气水合物是 21 世纪新型的非常规能源之一, 具有储量大和分布广等特点, 实现其商业化开采对缓解世界能源危机、调整我国传统能源结构和落实“双碳目标”具有重要意义。然而, 水合物地层主要分布在海洋区域, 具有埋藏浅、弱固结等特性, 容易导致开采出砂威胁长期安全生产。已有的世界范围内水合物试采结果表明, 出砂是水合物开采过程中难以避免的现象, 严重的出砂问题甚至会导致开采设备损坏和试采中止。因此, 如何实现可靠有效且长期稳定的出砂防控在水合物开采中尤为重要。

1 研究背景

我国两次水合物试采数据表明(Li Jinfa et al., 2018; 叶建良等, 2020), 南海水合物层属于泥质粉砂储层, 相较于日本南海海槽水合物储层, 渗透率较低, 开采难度较大, 常规的单一直井开采产能较小, 难以满足商业化开采需求, 故而后续采用水平井或分支井进行降压开采以提高产能成为主要研究方向之一。从常规油气开采领域防砂经验来看, 砾石充填防砂适用于深海油气资源开采, 且防砂可靠, 长期稳定, 也能起到稳定井壁的作用, 被认为是水合物开采防砂的首选方式。因此, 进行水平井段砾石充填研究对于优化充填参数, 提高充填效率, 指导现场水合物试采防砂作业具有重要意义。

然而, 目前关于水合物储层水平井砾石充填研究较少, 大部分均是借鉴常规油气井眼砾石充填研究。在水合物储层砾石充填研究方面, 李彦龙等对充填防砂进行了系统研究, 其借鉴常规油气防砂技术、稠油出砂冷采技术、适度防砂技术等, 提出关

于水合物防砂治理需要解决的关键问题, 推荐水合物防砂应该采用套管砾石充填工艺。针对我国南海神狐某站黏土质粉砂型水合物储层, 提出了“防粗疏细”式防砂充填层砾石尺寸设计; 同时, 其对充填过程中滤失速率、充填砾石颗粒密度、砂比、携砂液粘度、携砂液密度等参数进行了分析, 并基于南海水合物储层特征, 分析了水合物储层水平井砾石充填完井的制约因素和关键参数, 提出了采用“轻质砂+低砂比+降粘剂”组合工艺有利于进行深海水平井砾石充填作业(Li Yanlong et al., 2021)。

综上, 当前水合物储层水平井砾石充填研究还相对较少, 相关充填因素的影响还未探明。因此, 本文采用数值模拟方法, 在水平井砾石充填模型验证准确的基础上, 以我国南海第二次试采为背景, 构建了储层尺度下的水平井砾石充填模型, 进行三维可视化模拟, 以探明砾石充填过程形态变化, 不同充填因素(完井液密度及粘度、砾石密度和携砾液充填速度)对充填效果的影响。

2 模型构建

2.1 区域背景

我国第二次试采区位于中国南海北部珠江口盆地白云凹陷北坡神狐海域, 水深约为 1000~1500 m。通过勘探数据表明, 该地区岩性主要是泥质粉砂, 矿物以泥质、砂质和钙质为主, 含量分别为 47.2%、36.4%和 10.2%; 其中, 水合物藏系统分为 3 层。本次试采采用水平井进行降压开采, 防砂采用砾石充填和预充填筛管相结合的三级复合防砂技术来进行防砂, 提高了砾石充填效率, 试采结果表明该防砂技术效果良好, 生产稳定。

2.2 研究方法

本模拟采用多相流软件 TransAT 进行模拟, 主

收稿日期: 2023-04-10; 改回日期: 2023-05-06; 责任编辑: 刘志强。DOI: 10.16509/j.georeview.2023.s1.239

作者简介: 秦帆帆, 1997 年生, 硕士在读研究生, 地质工程专业; Email: qff1211@cug.edu.cn。通讯作者: 孙嘉鑫, 男, 1989 年生。副教授, 地质工程专业; Email: jiaxinsun@cug.edu.cn。

要使用欧拉—欧拉方法，在模拟过程中，将砾石均视为连续介质，忽略液固两相之间的质量传递，即重点关注在充填过程中砾石的空间分布状态，不考虑水合物生成和分解情况。通过与砾石充填实验相验证确定了模型的准确性。

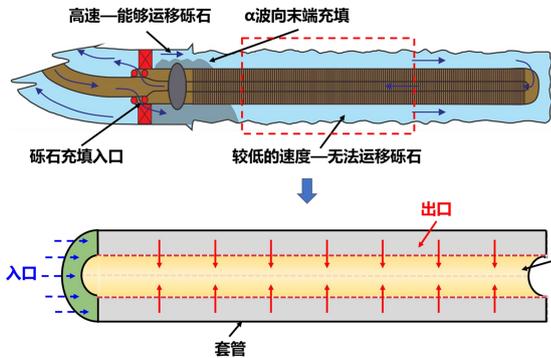


图 1 水平井砾石充填模型简化示意图

2.3 模型及案例设计

如图 1 所示，对水平井砾石充填模型进行了简化，截取井筒中间部分进行建模，设置模型入口为速度入口，携砾液与砾石均从此进入，筛管设置为多孔介质，只允许携砾液流出，为压力出口；其余边界均设置为不允许携砾液和砾石通过。

根据南海第二次试采所采用的水平套管尺寸，设置本模型套管内径为 200.50 mm，筛管外径 146.99 mm，本文选取四个砾石充填参数进行研究，分别为完井液密度及粘度、砾石密度和携砾液充填速度，其中，砾石充填速度依据验证结果均设置选取较低值，分别为 0.2 m/s、0.4 m/s、0.6 m/s 和 0.8 m/s；砾石密度组分别设置为 1200 kg/m³、1700 kg/m³、2200 kg/m³ 和 2700 kg/m³；完井液密度组分别设置为 1.00 g/cm³、1.07 g/cm³、1.3 g/cm³ 和 1.5 g/cm³，其中 1.07 g/cm³ 接近该地区完井液密度上限，

选择其它较大的参数取值旨在探索完井液密度对充填规律的影响；完井液粘度组分别设置为 0.8 mPa·s、1.0 mPa·s、1.3 mPa·s 和 1.5 mPa·s。

3 结论

图 2 为不同砾石充填因素的模拟结果，主要结论如下：

(1) 完井液性能（密度和粘度）对于砾石充填效果的影响相对较小，在密度窗口可调节范围较窄的情况下，调整完井液密度对充填效果的影响比较有限，一般应采用较低粘度的完井液会更利于砾石充填。

(2) 减小充填砾石的密度可以降低平衡堤高度，提高α波充填速度。类似地，当携砾液充填速度增加时也会显著提高砾石充填效率。因此，结合上述认识，采用低粘度完井液、轻质砾石和较高的携砾液充填速度可以有效提高水平井砾石充填效率。

参 考 文 献 / References

叶建良, 秦绪文, 谢文卫, 卢海龙, 马宝金, 邱海峻, 边航. 2020. 中国南海天然气水合物第二次试采主要进展. 中国地质, 47(3), 557~568.

Li Jinfa, Ye Jianliang, Qin Xuwen, Qiu Haijun, Wu Nengyou, Lu Hailong, Xie Wenwei, Lu Jing, Peng Fei, Xu Zhenqiang, Lu Cheng, Kuang Zengui, Wei Jianguo, Liang Qianrong, Lu Hongfeng, Kou Beibei.. 2018. The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea. China Geology, 1(1): 5~16.

Li Yanlong, Wu Nengyou, Gao Deli, Chen Qiang, Liu Changling, Yang Daoyong, Jin Yurong, Ning Fulong, Tan Mingjian, Hu Gaowei. 2021. Optimization and analysis of gravel packing parameters in horizontal wells for natural gas hydrate production. Energy, 219.

QIN Fanfan, SUN Jiabin, GU Yuhang, CAO Xinxin, YOU Zhigang, NING Fulong: Sensitivity simulation study of gravel packing factors in sand control of horizontal wells in a hydrate reservoir

Keywords: hydrate; horizontal well; gravel pack; transAT; sand control

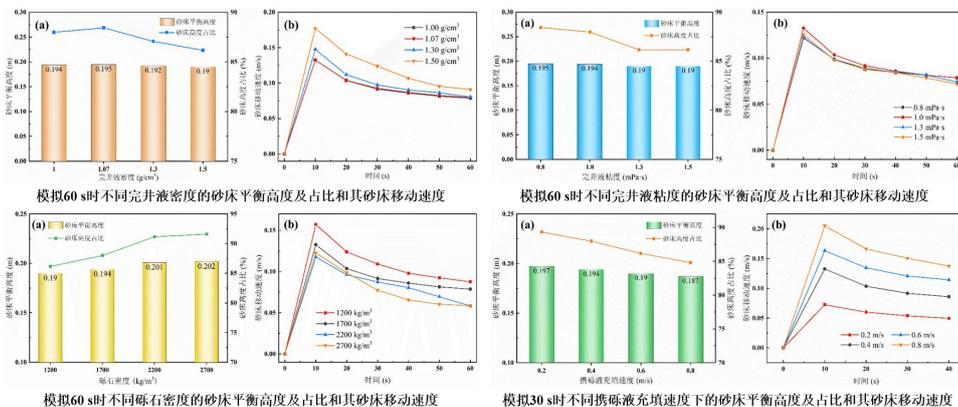


图 2 模拟结果