海相砂岩底水稠油波及规律的研究与应用

缪　云　戴　宗　闫正和　王亚会　冯沙沙

（中海石油（中国）有限公司深圳分公司，广东　深圳　518000）

摘　要：M4-2 油田是典型的海相砂岩油田，其稠油油藏开发进入特高含水期，采出程度偏低（平均不到 20%）。油田开发中后期剩余油高度分散，挖潜难度日益增大，怎样合理部署加密井网提高开发效果成为一大难题。研究通过长期水驱实验和机理模拟量化得到四项主控因素下的波及范围。形成了适用于海相砂岩底水稠油油藏波及规律量化表征方法。

关键词：海相砂岩；稠油加密；特高含水；波及；驱替

1 研究的技术路线

随着我国海上稠油探明储量的增加，海上稠油开发在我国海上石油开发中的地位越来越显著。虽然陆上稠油油藏热采技术已有较多成功经验，但海上稠油开发仍然面临着诸多挑战，如开发经验较少，水驱机理认识不清等问题[1]。本次研究针对海相砂岩稠油底水油藏后期加密调整难的问题，通过水驱波及和机理实验量化得到四项主控因素下[2]的波及范围。

2 底水驱稠油波及规律量化研究

2.1 波及规律的表征

通过三维大尺度的水驱波及物理模拟实验发现底水稠油油藏水脊形态变化为：

①局部锥进；

②局部见水；

③局部上托；

④围绕见水点拓展，即“先锥后托”的模式（图 1）。

对比底水稠稀油井的上水模式[3]，发现稠油井的水锥效应明显。

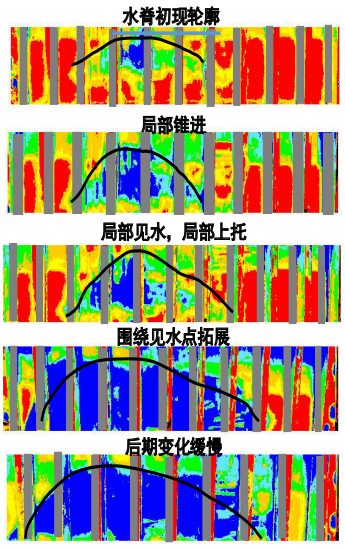


图 1　物理模拟稠油水驱波及形态

水平井波及规律的研究，可将其拆分为两个方向[4]：沿井筒和垂直井筒方向，水平井主流线所在平面作为沿井筒方向波及表征的基准面（见图 2），垂直水平井筒方向截取水平井中部所在平面作为垂直井筒方向波及表征的基准面[5]。稠油油藏由于其粘度高，油水流度比较大，水驱前缘为表观波及范围，由于粘性指进现象的存在，水驱前缘内部存在油水过渡带，即存在内波及和外波及范围。开发后期，从模拟研究可以发现稠油水平井开发表现出更强的非活塞驱替特征[6]，脊间富集是其开发至中后期的主要剩余油分布模式[7]。

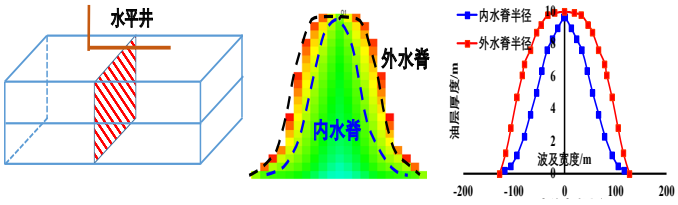
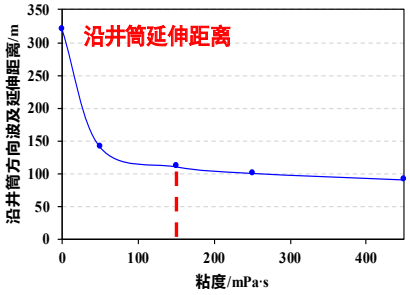


图 2　水平井垂直井筒方向波及和内外水脊形态

2.2 影响波及规律的主控因素

2.2.1 粘度影响



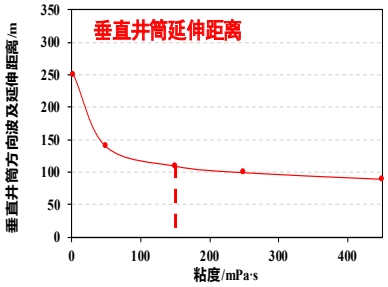


图 3　沿井筒和垂直井筒方向粘度与延伸距离关系曲线

数值模拟机理研究设计粘度 3MPa·s~450MPa·s 的原油进行分析，发现随着粘度增加，波及范围扩展的距离逐渐变小（见图 3）。原油粘度与波及范围呈负相关

性并存在拐点，当原油粘度超过 150MPa·s 时，波及范围变小的速度减缓。因此稠油粘度越大，油水流度比也越大，在相同渗透率的储层中，表现出更强的非活塞性驱替[8]，“粘性指进”现象更明显，波及范围扩展变小。

2.2.2 水油砂厚比影响

采用数值模拟量化分析，分别设计油层厚度为 5m、10m、15m，对应油水砂厚比为 0.3、1、3 的储层进行机理模拟发现相同粘度下，油水砂厚比越大，水锥突进的越慢，优势通道形成时间越晚，波及范围则越大。因此油水砂厚比与波及范围呈现正相关性（见图 4）。

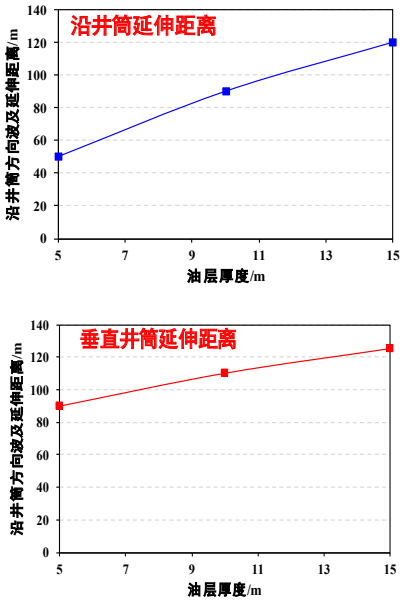


图 4 沿井筒和垂直井筒
方向油层厚度与延伸距离关系曲线

2.2.3 隔夹层分布影响

通过物理平板实验和数值模拟不同范围夹层下的波及形态分析：随着夹层范围的增大，水驱波及范围逐渐增大。并且定量实验分析发现（见图 5），当隔夹层的范围大于水平段长度时，波及延伸的距离扩大至无夹层状态下的 2–3 倍。

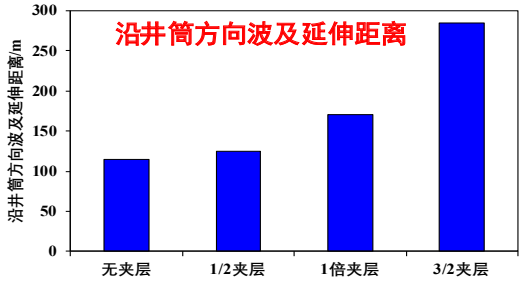


图 5 不同隔夹层范围下波及延伸距离

2.2.4 渗透率各向异性影响

地层渗透率各向异性对于底水波及影响非常大，若垂向渗透率较大，则底水突破较快，波及延伸距离变短。如图 6 所示，随着 k_v/k_h 的增大，波及体积逐渐变小，但当 k_v/k_h 超过 0.5 以后影响逐渐变小，渗透率各向异性与波及距离呈明显负相关性。

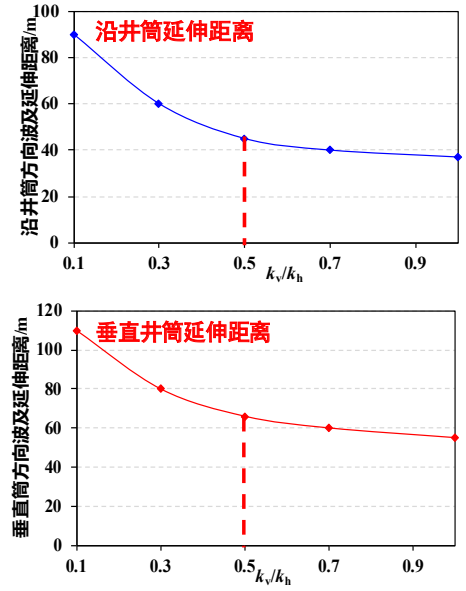
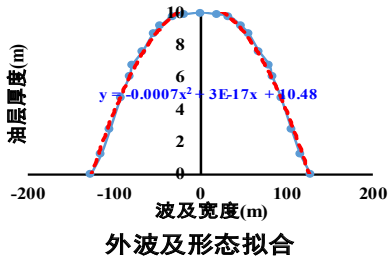


图 6 沿井筒和垂直井筒方向 k_v/k_h 与延伸距离关系曲线

3 油田实际应用成效



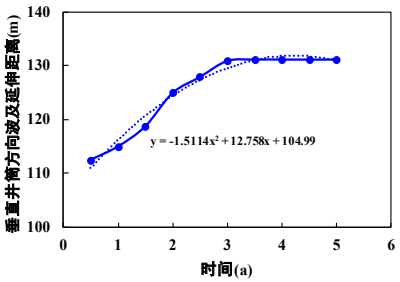


图 7 理论推算波及延伸距离约 130m

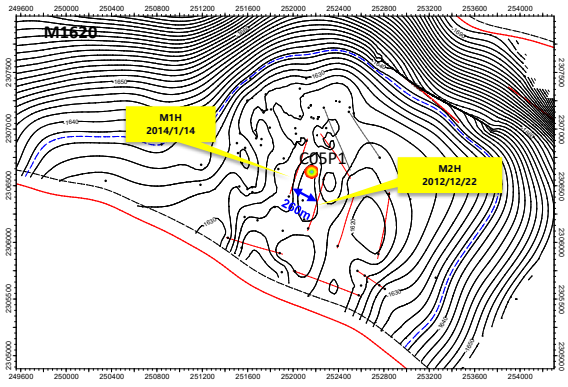


图 8 M1620 油藏井位图

采用稠油驱油机理的理论分析得到的单井波及范围与现场过路井密闭取芯分析结果一致，例如 M1620 油藏应用理论计算单井波及范围约为 130m（见图 7）。该油藏进入特高含水期后，在相距 260m 的在生产井 M1H 与

M2H 中间实施的领眼井 C05P1（见图 8），测井该处证实含油性好（见图 9）。由此证实单井实际动用范围与理论研究一致。基于此项研究发现 M 油田的稠油底水油藏有极大的加密挖潜空间，原井距可再缩小 1 倍以上，据此推动该油田大规模加密调整。

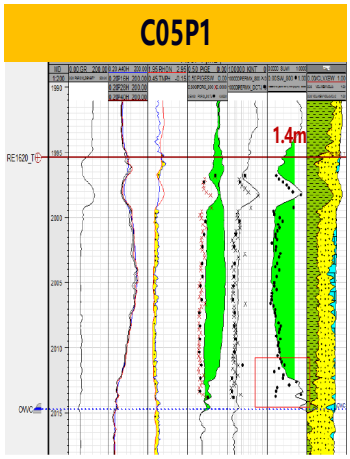


图 9　C05P1 测井解释曲线

4 总结

本文通过对海相砂岩稠油底水油藏波及规律量化研究，发现粘度、渗透率各向异性与单井波及范围呈负相关性，隔夹层的分布、水油砂厚比与单井波及范围呈负相关性。由此规律量化可指导现场对稠油大底水油藏在夹层不发育的区域进行井间加密调整。

参考文献：

[1] 罗东红，闫正和，梁卫，刘伟新，顾克金 . 南海珠江口盆地海上砂岩油田高速开采实践与认识 [M]. 北京：石油工业出版社 ,2013.

[2] 罗东红，梁卫，刘伟新 . 珠江口盆地砂岩油藏剩余油分布规律 [M]. 北京：石油工业出版社 ,2011.

[3] 喻高明，凌建军 . 砂岩底水油藏开采机理及开发策略 [J]. 石油学报 ,1997,18(2):62-65.

[4] 姜辉，于兴河，张响响 . 主流随机建模技术评价及约束原则 [J]. 新疆石油地质 ,2006(05).

[5] 印兴耀，贺维胜，黄旭日 . 贝叶斯 - 序贯高斯模拟方法 [J]. 石油大学学报 ,2005(05).

[6] 黄尚军，杨帆，潘举玲，徐强 . 精细油藏数值模拟技术及应用 [J]. 断块油气田 ,2002(05).

[7] 韦建伟，罗锋，唐人选 . 关于开采底水油藏几个重要参数的确定 [J]. 大庆石油地质与开发 ,2003.

[8] 柳成志，张雁，单敬福 . 砂岩储层隔夹层的形成机理及分布特征 [J]. 天然气工业 ,2006,26(7):15-17.

作者简介：

缪云（1987- ），女，汉族，籍贯：湖北武汉，学历：硕士，研究方向：油气田开发。

项目名称：《番禺 4-2 油田海相强水驱稠油油藏提高采收率技术研究》编号：CCL2017SZPS0340

项目性质：“十三五”重大专项。

（上接第 108 页）无人值守站，备用计量系统是必不可少的。采用基于大数据分析的数据挖掘技术，引入自控系统的调节功能，及调压系统的压力流量 PID 整定自调节功能，全方位实施计量数据的动态实时监测，设定基于供需平衡的《管道运行控制原则》实现计量数据的对比控制及计划指标的科学输配。

4.5 系统的维护管理

应用自动化控制技术，采用报警预警系统设备，SIS 仪表安全系统，FGS 火气系统，ESD 紧急切断系统，SCADA 数据采集系统，并加强系统逻辑程序的分析部署，完成系统对输气参数进行实时采集和管理，提高输气管道的智能化水平。对长输天然气管道系统进行实时的数据动态监测，完善数据深度挖掘应用开发，及时控制管道系统异常，通过自控系统的自整定或人工辅助远程控制功能来实现控制和管理，对异常情况响应，保证管输系统的正常运行。

4.6 场站的运营管理

无人值守站的运营管理主要包括了设备管理、自控管理、计量管理、维护管理、外协管理、检验管理、异常管理、联络管理、安全管理、警戒管理、消防管理、变更管理等十二项主要内容。各项内容均应制定统一的执行制度标准，强化无人值守站“以人为本、高效便捷、安全经济、稳定可靠”的核心运营理念，继续推进设备智能化、现场无人化、控制集中化、运行维护化。

5 结语

无人值守站的建设及运营不仅能带来经济效益，同时可实现企业组织架构重塑，从运营角度来看，节约了人力成本、压缩了工作流程，实现了企业流程再造；但从安全角度来说，为了保障安全，高端设备、控制系统、专业检维成本必将提升。具体基于哪个阶段的运行模式，各企业只能结合区域经济发展情况，做出适合自身企业安全经济发展的决策，从事无人值守站的建设及管理的人员更需加强市场研究和判断，做好设计施工、物资采购、联调联试、运行监控的全面配套管理工作，运行方面做好调度、检维、操作人员的高效动态配置，方能在行业市场提质升级的进行中长远立足。

参考文献：

[1] 张世梅，张永兴 . 天然气长输管道无人站及区域化管理模式 [J]. 石油天然气学报 ,2019,41(06):139-144.

[2] 李国海，董秀娟，李国海，董秀娟 . 天然气管道无人值守站建设及站场安全运行 [J]. 管道保护 ,2018(05):11.

[3] 周巍，缪全诚 . 关于长输天然气管道数字化无人值守站场建设的探索 [J]. 管理科学与工程 ,2021,10(2):183-187.

作者简介：

李松（1987- ），男，汉族，云南昆明人，本科，油气储运工程师，主要从事油气储运、安全运营方向的技术研究工作。