

引用格式:于金彪,胡慧芳,孟薇,等.胜利油田油藏数值模拟技术新进展及发展方向[J].油气地质与采收率,2024,31(5):162-170.

YU Jinbiao, HU Huifang, MENG Wei, et al. New progresses and development directions of reservoir numerical simulation technology in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(5): 162-170.

胜利油田油藏数值模拟技术新进展及发展方向

于金彪,胡慧芳,孟薇,董亚娟,史敬华,段敏,侯玉培,郑乃元

(中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院,山东 东营 257015)

摘要:油藏数值模拟技术是油藏分析的重要手段,是油田开发人员编制开发方案、开展动态跟踪调整、进行提高油藏采收率研究等工作的有力工具。为明确胜利油田油藏数值模拟技术的未来发展方向,回顾了胜利油田60年以来油藏数值模拟应用技术和自主知识产权软件研发的发展历程,着重总结了“十三五”以来适配油田当前地质及开发特征的特高含水期精细油藏描述、低渗透油藏压驱开发、非均相复合驱、稠油油藏多元热复合驱、CO₂高压混相驱、页岩油大规模压裂整体开发等多个领域的数值模拟应用技术创新性进展;介绍了涵盖水驱、化学驱、微观、智能模拟等不同方向的多款胜利特色油藏数值模拟软件的研发及应用情况。最后指出在当前胜利油田的开发形势下,油藏数值模拟在精细程度、规模、效率和协作方式等方面面临着更大的挑战,油藏数值模拟需要进一步向一体化、并行化、智能化方向发展,为胜利油田开发提质增效提供技术支撑。

关键词:油藏数值模拟;特高含水期;压驱模拟;非均相复合驱;多元热复合驱;CO₂高压混相驱;页岩油;胜利油田

文章编号:1009-9603(2024)05-0162-09

DOI:10.13673/j.pgre.202405030

中图分类号:TE319

文献标识码:A

New progresses and development directions of reservoir numerical simulation technology in Shengli Oilfield

YU Jinbiao, HU Huifang, MENG Wei, DONG Yajuan, SHI Jinghua, DUAN Min, HOU Yupei, ZHENG Naiyuan
(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company,
SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: Reservoir numerical simulation technology is an important means of reservoir analysis, and it is a powerful tool for oilfield developers to design development schemes, proceed with dynamic tracking adjustment, and enhance oil recovery of reservoirs. In order to clarify the future development directions of reservoir numerical simulation technology in Shengli Oilfield, this paper reviewed the development process of reservoir numerical simulation application technology and independent intellectual property software in Shengli Oilfield over the past 60 years and summarized the innovative progress in numerical simulation application technology in many fields since the “13th Five-Year Plan in 2011-2015” period, which is applicable to current development and geological characteristics of Shengli Oilfield. The fields covered fine reservoir description in ultra-high water-cut stage, pressure flooding development in low-permeability reservoirs, heterogeneous combination flooding, multiple thermal combination flooding in heavy oil reservoirs, high-pressure CO₂ miscible flooding, and integrated development of shale oil by large-scale fracturing. Then, this paper introduced the development and application of several reservoir numerical simulation software with Shengli characteristics, involving water flooding, chemical flooding, and micro and intelligent simulation. Finally, it was pointed out that under the current development situation of Shengli Oilfield, the reservoir numerical simulation is facing great challenges in terms of refinement, scale, efficiency, and collaboration approach, and the numerical simulation of reservoirs should be further developed towards integration, parallelization, and intelligence, so as to provide technical support for improving the quality and efficiency of Shengli Oilfield development.

收稿日期:2024-05-20。

作者简介:于金彪(1970—),男,河北故城人,研究员,博士,从事油藏地质建模及数值模拟方面的研究。E-mail:yujinbiao.slyt@sinopec.com。

Key words: reservoir numerical simulation; ultra-high water-cut stage; pressure flooding simulation; heterogeneous combination flooding; multiple thermal combination flooding; high-pressure CO₂ miscible flooding; shale oil; Shengli Oilfield

胜利油田地质状况复杂,油藏类型多,开发历程长。针对不同类型油田的开发特点和难点,通过持续攻关,形成了较为完整的数值模拟技术系列。随着油田开发程度的不断加深,开发难度日益加大,开发成本不断攀升,利润空间不断压缩,胜利油田进入新的开发阶段,先后发展了非均相复合驱、CO₂高压混相驱等新的开发技术,并向致密油、页岩油等难动用新领域拓展。在新的开发形势下,为适应日益复杂的矿场需求,胜利油田丰富发展了多项油藏数值模拟技术,应用于油田开发方案编制、动态跟踪调整、提高油藏采收率等研究方向,在油田低成本效益开发中发挥了重要作用。

1 发展历程

胜利油田建模数模工作起步于20世纪60年代末期,先后经历了探索攻关、初步应用、快速发展、全面推广应用4个阶段,实现了从单一水驱井组模型到热采、化学驱、气驱等多种开发方式规模化应用,有力支撑了整装、断块、低渗透、页岩油等不同类型油藏开发方案的编制及矿场动态跟踪研究。建模数模应用技术发展始终伴随着软硬件配置优化、自主软件研发、应用对象的不断拓展和进步,实现了模拟规模和研究精度的不断完善和提高。

第1阶段为探索攻关阶段(1965—1990年)。1973年自主研发胜利油田第1个二维二相油藏数值模拟软件,应用对象为水驱井组模型。第2阶段为初步应用阶段(1990—2000年)。软硬件方面初步引进商业化数值模拟软件(Eclipse、CMG)、服务器和 workstation,经自主研发初步形成了化学驱数值模拟软件、油藏工程综合分析软件。数值模拟技术的主要应用对象仍然是水驱砂岩油藏,可开展部分简单的化学驱模拟。第3阶段为快速发展阶段(2000—2010年)。软硬件配置方面引进并行服务器、地质建模软件 Petrel、并行版数值模拟软件 VIP,并自主研发了三维三相黑油数值模拟软件、地质建模软件等,应用对象拓展到了整装、断块、低渗透等油藏类型,涵盖了水驱、热采、化学驱、气驱等不同开发方式。第4阶段为全面推广应用阶段(2010年至今)。软硬件配置方面引进企业版 Direct、Eclipse、一体化软件 Petrel RE 等商业化软件,自主研发软件包含微观模拟和 CO₂驱组分模拟、模型库管理软件等,应用

对象从常规油藏拓展到 CCUS、压驱、页岩油等建模数模的技术应用。

建模数模研究精度实现了由“粗”到“精”再到“准”的迭代提升。从初期的刻画纵向隔层、小层,驱替机理简单,模型网格尺寸较大的油水两相黑油模型,逐步发展了纵向精细刻画韵律段、单砂体、侧积体,探索化学驱、热采、混相驱等复杂驱替机理,模型网格尺寸精细化的黑油+组分模型,最后到准确描述隔夹层、侧积体、低序级断层等地质特征以及高耗水、非均相复合驱、热化学驱等渗流机理,实现高拟合率和高方案符合率的精准模拟和精准优化研究。随着胜利油田开发领域的不断拓展,持续开展地质刻画、机理描述等基础研究,形成了覆盖全油藏类型、具有胜利油田特色的水驱、气驱、化学驱、热采、页岩油等建模数模5大技术系列、20余项特色关键技术,实现了技术应用的流程化、规范化、规模化。

2 数值模拟应用技术新进展

“十三五”以来,胜利油田在继续加大成熟数值模拟技术推广应用的同时,针对特高含水期精细剩余油描述、低渗透油藏压驱开发、非均相复合驱、稠油油藏多元热复合驱、CO₂高压混相驱、页岩油大规模压裂整体开发等数值模拟技术持续加强攻关,取得了新的进展。

2.1 特高含水期油藏精细数值模拟技术

针对常规油藏数值模拟难以准确描述特高含水后期油水差异渗流的问题,建立了特高含水期油藏精细数值模拟方法^[1],形成了特高含水后期油藏数值模拟软件,准确描述油水运动规律和剩余油分布,为实现精细油藏描述提供技术支撑。

2.1.1 机理表征

网格尺寸优化及渗流规律表征 特高含水后期油藏剩余油^[2-4]描述需要更加精细,根据模型网格尺寸研究需求,建立油藏模型网格尺寸优化图版(图1),确定模型网格划分原则,保证模拟精度和运算效率。针对特高含水后期油水渗流特征^[5-7],建立特高含水后期相渗端点拓展方法,反映极限驱油效率与物性变化规律关系,创建不同渗透率储层高倍水驱相渗曲线拓展方法,标定拓展得到高驱替倍数相渗曲线,准确描述油水运动规律。

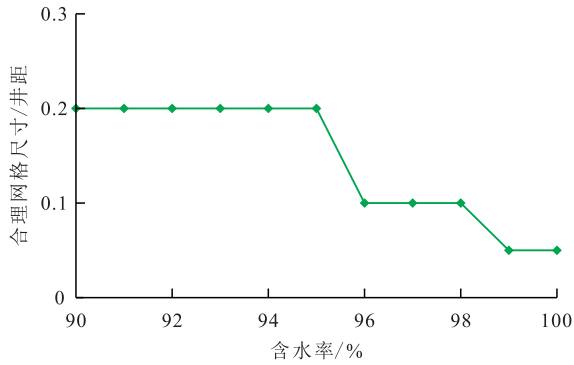


图1 平面无因次合理网格尺寸图版

Fig.1 Areal chart of dimensionless rational grid size

差异化渗流精细模拟方法研究 通过开展物理实验,研究了不同物性、不同压差下物性干扰对流体流动规律的影响,通过构建油水相修正系数的数学模型,反映不同物性储层渗流差异化,将修正系数改进到油水渗流方程,实现差异化渗流定量表征。在差异化渗流定量表征模型(表1)基础上,改进油水渗流方程,完善自主知识产权的特高含水期三维三相黑油数值模拟软件主程序,在后处理中新增高耗水层精细表征分析模块和多因素控制下的剩余油定量表征模块,描述了特高含水后期油藏物性干扰对渗流规律的影响,实现了特高含水后期剩余油的精细描述。

2.1.2 应用效果

将特高含水期数值模拟技术应用于孤东七区西Ng5²⁺³区块油藏,描述了高耗水层带分布规律(图2)。对比实际取心与模拟结果,与常规模型相比,新数值模拟方法体现了剩余油分布的差异性,与取心结果更加对应,更加符合油藏实际。新方法刻画了极端耗水层带的形成时间、位置及对应水井情

表1 差异化渗流定量表征模型
Table1 Quantitative characterization model for differential flow

修正系数	公式	R ²
高渗透层水相	$\varphi_{wh}=(0.969\ 037-0.004\ 51\times S_w-0.033\ 15\times K_{mn})/(1-0.005\ 32\times S_w-0.034\ 26\times K_{mn})$	0.985
低渗透层水相	$\varphi_{wl}=(1.031\ 749-0.006\ 18\times S_w-0.035\ 69\times K_{mn})/(1-0.005\ 39\times S_w-0.033\ 82\times K_{mn})$	0.978
高渗透层油相	$\varphi_{oh}=(0.965\ 926-0.001\times S_w-0.067\ 86\times K_{mn})/(1-0.002\ 05\times S_w-0.068\ 32\times K_{mn})$	0.987
低渗透层油相	$\varphi_{ol}=(1.055\ 986-0.004\ 94\times S_w-0.031\ 03\times K_{mn})/(1-0.003\ 4\times S_w-0.029\ 29\times K_{mn})$	0.971

注: φ_{wh} 为高渗透层水相修正系数; S_w 为含水饱和度; K_{mn} 为渗透率级差; φ_{wl} 为低渗透层水相修正系数; φ_{oh} 为高渗透层油相修正系数; φ_{ol} 为低渗透层油相修正系数。

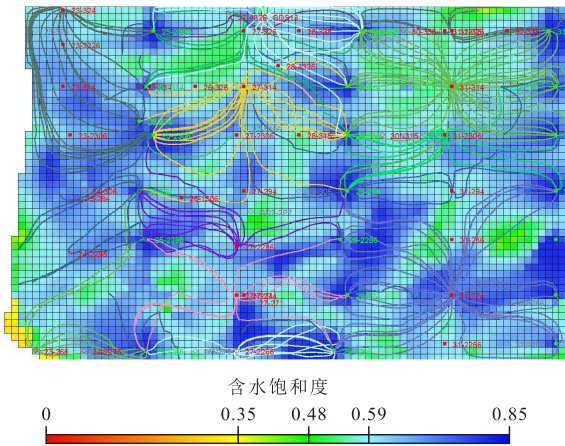


图2 孤东七区西Ng5²⁺³区块高耗水层带识别结果

Fig.2 Identification results of high-consumption water layers in west Ng5²⁺³ block in District 7 of Gudong Oilfield

况,有效描述了特高含水后期油水渗流规律和剩余油分布特征,为区块转流线调整方案的编制提供了技术支持。

2.2 低渗透油藏压驱数值模拟技术

针对低渗透油藏注水开发“注不进、采不出”问题,胜利油田提出了压驱技术,快速补充地层能量,大幅度提高油井产能及采收率。针对传统油藏数值模拟方法无法描述压驱注入—裂缝扩展—生产过程同步发生、相互影响的过程,创新提出了低渗透油藏压驱数值模拟技术,将压驱储层物性随有效应力降低而增大的动态变化机制^[8]、复杂缝网的形成及动态扩展^[9]集成到油藏数值模拟中,实现裂缝扩展、物性变化和压力同步耦合模拟,揭示了低渗透油藏压驱过程中水井增注和油井产能提升的致效机理。

2.2.1 机理表征

以传统油藏数值模拟模型为基础,考虑低渗透油藏启动压力梯度,引入有效应力-压力耦合方程^[10],结合物理模拟实验结果即储层物性(孔隙度、渗透率)随有效应力变化关系、压驱相对渗透率时变描述,构建了综合考虑储层物性动态演化、跨尺度裂缝体系特征的低渗透油藏压驱数值模拟模型,描述了流体场、应力场、裂缝改造带三场相互作用,解决了传统油藏数值模拟方法难以准确模拟压驱过程中储层物性动态变化的难题,精确刻画了压驱过程中缝网改造带动态扩展、物性演化及流体渗流能力变化,实现压驱注入、裂缝起裂扩展以及压力传导同步模拟。

2.2.2 应用效果

自2020年以来,胜利油田通过先导试验示范、矿场实践推广,创新形成了超前压驱、差异压驱、立

体压驱等模式,矿场应用规模、应用效果持续提升^[11]。累计实施井组624个,累计注水量为 $1\ 872\times 10^4\ \text{m}^3$,累计增油量为 $72.7\times 10^4\ \text{t}$ 。低渗透油藏压驱数值模拟技术应用于胜二区沙二段、东辛采油厂辛161块、滨435一期等区块,实现了高压注入、起裂扩展、压力传导同步模拟,拟合率达85%以上,准确反映了压驱增产增注的开发效果,为压驱压力传导规律等开发机理研究提供了技术手段,支撑了矿场均衡开发策略、压驱后补能方式、差异化压驱等开发方案全过程优化调控工作。

2.3 非均相复合驱数值模拟技术

非均相复合驱是胜利油田研发的新型驱替体系,由聚合物、表面活性剂和黏弹性颗粒组成。该体系在驱替过程中具有较好的扩大波及体积和提高洗油效率的作用,在实际生产中可以大幅度提高原油采收率。但是目前该技术的固液共存驱油动用机制还没有商业化的软件可以进行有效仿真模拟。为此研发了非均相复合驱数值模拟技术^[12],实现了对该体系驱油过程的有效模拟。

2.3.1 机理表征

有效封堵机理 黏弹性颗粒在多孔介质中有运移、堵塞、变形通过和沉积(再运移)等运动形式^[13-17],引入通过因子这一参数表示黏弹性颗粒通过单位孔隙体积前后的浓度比。该参数一方面可以反映颗粒通过孔喉时的通过能力,另一方面与颗粒启动压力有关,当压差小于启动压力时,通过因子较小,颗粒浓度传播缓慢从而在孔隙中聚集,形成封堵;当压差超过启动压力后,颗粒加速运移,从而实现了黏弹性颗粒随压力变化时堵时驱的动态特征描述。

液流转向机理 黏弹性颗粒在多孔介质中的堵塞作用会降低有效过流面积,改善低渗透通道的渗流能力,从而实现液流转向,调整油藏非均质性。残余阻力系数与黏弹性颗粒浓度、渗透率、流速有关,是表征流体流动能力的重要参数,通过增加液流转向系数修正残余阻力系数可有效描述液流转向的机理。当渗透率升高时,残余阻力系数迅速增大,反映出对高渗透区域的强封堵性;当流速增大时,残余阻力系数逐渐降低,使低渗透区域的流动能力增强。

2.3.2 应用效果

在孤岛中一区Ng3先导试验区非均相复合驱数值模拟研究中,准确模拟了非均相复合驱封堵和扩大波及体积的作用。预测先导试验中心区提高

采收率8.5%,最终采收率达到63.6%,中心区累计增油量为 $8.79\times 10^4\ \text{t}$,提高采收率7.15%。

随着老油田陆续进入开发中后期,应用非均相复合化学驱的单元数量逐年增长。近两年在20余个区块开展了非均相复合驱数值模拟应用研究,覆盖地质储量为 $9\ 652\times 10^4\ \text{t}$,预测提高采收率9.6%,提高了矿场实施方案的最优化和有效性。

2.4 稠油油藏多元热复合驱数值模拟技术

针对胜利稠油油藏老区经过多轮次蒸汽吞吐,动用半径小、非均质性强、驱替不均衡等难题,攻关以高干度蒸汽、氮气泡沫、高温驱油剂、 CO_2 等作为驱替介质的多元热复合驱开发技术^[18],并形成了配套的数值模拟技术,实现了复杂机理准确表征、多场前缘精细刻画、水浸和汽窜超前预警,支撑了胜利稠油油藏复杂驱油体系、多样开发方式接替开发。

2.4.1 机理表征

复杂机理表征 多元热复合驱常见的驱替介质有降黏剂、驱油剂、泡沫剂、 CO_2 、 N_2 等,通过非线性混合法表征降黏剂降低原油黏度机理;通过界面张力控制相渗曲线插值,改善油相相对渗透率,实现驱油剂降低界面张力、改变润湿性的机理描述;通过控制气相的流量、提高气相阻力系数来近似描述氮气泡沫选择性封堵、深度调剖机理^[19];通过相平衡常数表征氮气增能和 CO_2 溶解降黏、增能提高原油采收率机理。

多场前缘精细刻画 复合驱过程中温度、压力、饱和度等属性场变化剧烈,前缘刻画难度大,而蒸汽腔的扩展情况直接影响了热传导的效果,针对这一技术难点,攻关形成了动态网格^[20]和物性时变模拟技术,通过动态认识建立温度与渗透率的关系,描述储层物性时变规律,结合动态网格技术,提升了蒸汽腔、化学剂前缘追踪精度。

超前预警技术 边底水入侵和汽窜是制约蒸汽驱能否成功的最关键因素^[21-22],借助数值模拟手段,强化温度场、饱和度场、蒸汽干度等数值模拟结果挖掘分析,确定水浸、汽窜的位置和方向,实现通道的定性定量描述,通过在来水方向上提前设计提液井,优化注采参数、注入化学剂等方式提前干预,最大限度实现油藏的均衡驱替,提高油藏最终采收率。

2.4.2 应用效果

该项技术应用于春风油田排612区块,在 N_1S_1^1 层9个试验井组的模拟研究中,精细刻画了温度、压力、饱和度、化学剂浓度等多场前缘推进情况;通过优化化学剂注入方式、注入量、生产井液量等,实现

油藏的均衡驱替。与单一蒸汽驱相比,预计累计增油量为 16.2×10^4 t,提高采收率14%。

2.5 CO₂高压混相驱数值模拟技术

胜利油田针对低渗透油藏CO₂驱混相压力高、驱油效率低、非均质性强、易气窜的特点创新提出了CO₂高压混相驱油技术^[23]。针对高压混相驱油过程中油气相态变化复杂、地下混相状态难以判别、气窜预测准确性不高等难题,形成了以CO₂驱油机理表征、地下混相状态判别、动态跟踪优化为内涵的CO₂高压混相驱数值模拟技术。通过优化连续气驱、气水交替技术政策,确保CO₂最优注入,全面支撑CCUS示范工程绿色低碳开发。

2.5.1 机理表征

高压混相机理表征方法 通过对实验数据拟合与分析,重点拟合定容衰竭、等组分膨胀,注气膨胀实验,建立准确的流体相态方程,精细描述油藏自身流体性质和CO₂对原油的膨胀降黏机理;采用油气界面张力描述原油-CO₂的混相程度,并对油、气相的相对渗透率进行标定,反映油气混相对渗流能力的影响以及提高采收率的机理。最后应用已建立的相态模型开展细管实验,数值模拟验证与实验混相压力一致。

地下混相状态判别方法 通过数值模拟计算指标,利用混相压力前缘、CO₂组分前缘和CO₂气相前缘等3个前缘,将油藏划分为CO₂气区、混相区、混相潜力区、未波及区等4个区域,从而实现CO₂驱混相状态的定量描述。

动态跟踪优化技术 不断迭代“实施—跟踪—调整”方案,开展数值模拟动态跟踪优化。在跟踪的过程中,优先关注气油比,建立气窜标准,开展气窜预警,并及时调整,避免形成气窜通道,从而实现均衡驱替、扩大波及;同时兼顾压力拟合预测,调整注采参数,保障混相状态,提高驱油效果,延长措施有效期。

2.5.2 应用效果

在樊142-7-X4井组混相驱先导试验跟踪研究^[24]中,针对混相开发目标,实时监测地下混相状态^[25]及CO₂前缘推进情况,进行气窜预警,该方法预测的CO₂气相前缘距注气井70~100 m,与注入井压降试井模型预测结果(79 m)相近^[26]。根据现场需求开展“分阶段即时目标”的实时跟踪优化,在超前注气阶段开展了超前注气速度、压力保持水平、开井方式等优化;投产初期开展了单井配产配注、转抽方案等优化;见气阶段进行了耦合注采等优

化。该区块开井后3口油井均自喷生产,单井日产油量为6~9 t/d,后期2 a单井日产油量稳定在5 t/d,远大于注气前1.8 t/d。

2.6 页岩油数值模拟技术

济阳坳陷页岩油压裂开发中存在孔缝系统差异、层理缝高度发育等难点,传统油藏数值模拟难以解决。2022年以来建立了基于地质工程一体化页岩油数值模拟技术,精细描述了页岩油大规模压裂开发过程中复杂缝网扩展规律及多重介质流动规律,实现立体开发全流程模拟。

2.6.1 机理表征

页岩油数值模拟中,对多重介质的分区和渗流机理的准确表征至关重要。基质、天然缝和人工裂缝在页岩储层中有着不同的渗流特征和应力敏感性。合理区分和描述不同介质的特性,可以更好地理解油气在储层中的流动行为和响应机制。通过建立不同区域的分区,如主缝区、微缝区、天然缝区和基质区,可以更准确地模拟渗流通道和预测产能。此外,对基质非线性流动特性和应力敏感性的表征,有助于深入研究页岩油在不同条件下的渗流行为和相渗规律。

2.6.2 应用效果

基于地质工程一体化页岩油数值模拟技术可以在不同阶段实现立体井网协同优化、压裂方案优化设计、压裂套损风险判别和放喷生产制度优化。该技术已在牛庄、民丰等5个洼陷开展应用,优化了33口水平井的压裂投产,取得产能突破。特别是樊页平1井区立体开发井组中的5口井,峰值日产油量超过百吨,6口井单井累计产油量过万吨。牛庄洼陷牛页一区的20口试验井组成功实现了全流程模拟优化(图3),为立体压裂开发提供了强力支撑。

3 自主软件研发新进展

胜利油田成立之初,设立了水动力学组,在理论上对水动力计算方法进行探讨和研究,是油藏数值模拟技术最初的研究方向。1975年之前,对数值模拟软件开展了初步的探索性研究,但受硬件条件所限无法满足矿场的规模和效率需求。1975—1985年,国外引进的计算机设备为数值模拟软件的研制创造了条件,胜利油田逐步研发了十几种小型软件,包括水驱平面二维二相、剖面二维二相、二维三相剖面模型、变泡点三相剖面模型、单井水锥模

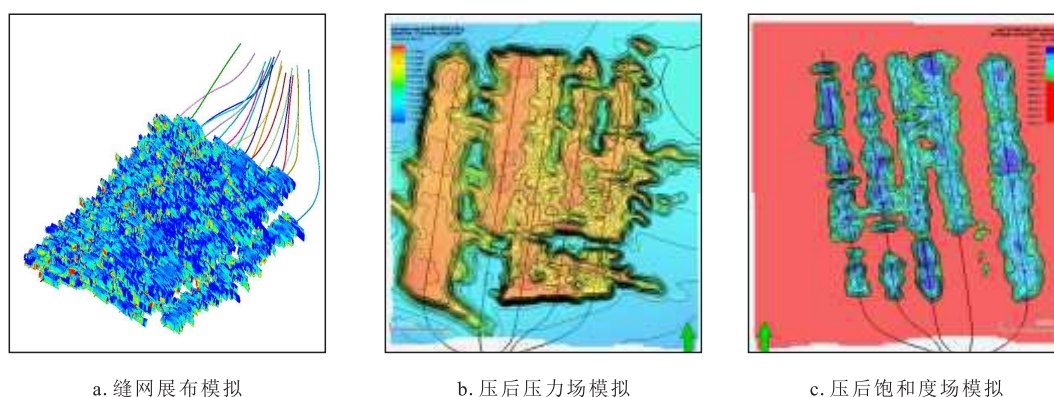


图3 牛页一区试验井组整体模拟效果

Fig.3 Overall simulation effect of test well group in Block NY1

型、压力恢复曲线、裂缝油藏水锥模型、裂缝油藏压力恢复曲线、油田开发动静态数据处理、单井示踪剂、单井蒸汽吞吐、开发绘图软件包等,至1990年,已形成了微机数值模拟软件系列,在胜利油田各采油厂及中原油田、河南油田等进行了推广应用。1990年后,随着水驱、化学驱数值模拟软件不断引进,油藏数值模拟技术应用更为广泛,攻关形成了涵盖水驱、化学驱、气驱、热力+等具有胜利特色的数值模拟技术系列,油藏数值模拟自研软件也进入到一个新的研发阶段。经过多年的软件研发及配套技术应用研究,形成了胜利油田自主知识产权的首个水驱数值模拟软件——三维三相黑油模型并行软件和目前唯一能够模拟非均相复合驱的化学驱数值模拟软件SLCHEM,并开展了矿场应用。随后自动化智能化技术逐步兴起,研究对象也从宏观储层岩石转向微观孔隙,自研软件伴随着技术的发展和矿场的研究应用需求形成了涵盖水驱、化学驱、微观、智能模拟等不同方向的多款数值模拟软件。

3.1 特高含水期数值模拟软件

胜利油田经过多年开发,整体进入特高含水后期,剩余油分布更加分散,油水渗流规律及流场发育复杂,常规水驱数值模拟软件已无法准确表征特高含水期油水驱替规律。在三维三相黑油模型数值模拟软件的基础上,针对特高含水期油藏油水运动规律和剩余油分布复杂等特点,开发了特高含水后期相渗曲线处理功能模块、储层物性参数时变功能模块、附加压降和层间干扰渗流表征模块、非均质流场描述拓展功能模块,形成了特高含水期数值模拟软件平台,实现了特高含水后期油水差异化渗流定量描述,为特高含水期油藏的方案研究提供了研究工具和技术保障。

3.2 化学驱数值模拟软件SLCHEM

SLCHEM软件是以UTCHEM^[27-28]为基础,紧跟胜利油田化学驱新型驱油体系和化学驱技术的发展,历经30多年持续攻关^[29-33],形成的集模型数据前处理、主模型运算、模拟结果分析于一体的综合研究平台,具备非均相复合驱体系、乳化增黏复合驱体系、乳化降黏复合驱体系等新型驱油体系的模拟功能^[34-35],可开展聚合物、表面活性剂、PPG等单剂或多剂的化学驱数值模拟研究,是国内唯一可以表征和模拟非均相复合驱的数值模拟软件。

该软件在串并行求解方面形成了一系列原创性技术^[36-37],实现了整体模型的自适应网格算法和代数多重网格算法求解压力方程,研发了基于OPENMP+MPI混合并行求解算法,大幅提升了数值模拟运算速度,实现了千万级网格模型的快速计算,满足了矿场规模化应用的需求。

目前,SLCHEM软件已在胜利油田、河南油田等20多个油藏区块开展了二元复合驱、非均相复合驱等多种开发方式的数值模拟跟踪应用,累计覆盖地质储量达 1×10^8 t以上,取得了良好的应用效果,有效支撑了化学驱提高采收率技术的发展。

3.3 微观数值模拟软件

胜利油田自主研发的微观数值模拟软件是以Navier-Stokes方程为基础的孔隙尺度微观数值模拟软件,除水驱微观模拟功能外,添加了聚合物、表面活性剂、PPG单剂的机理描述,具备单剂和二元复合驱及非均相复合驱的模拟功能。

该软件包括前处理、主模拟器和后处理模块,具有三维数字岩心构建、微观模型建立、孔隙流动数值模拟和三维动态显示及结果指标输出等功能,可以实现不同岩心孔隙结构特征、流体性质、驱替条件下的两相渗流规律描述、剩余油分布类型统计分析和力学机制研究,具有模拟功能全、计算精度

高、使用方便的特点,满足了孔隙尺度岩心数值模拟研究的需要。

利用该软件开展了微观水驱油流动模拟和化学驱提高采收率机理研究,分析了水驱过程剩余油赋存状态的演化规律,从微观尺度揭示了特高含水期相渗突变点产生的原因,支撑了特高含水期高耗水理论研究;开展化学驱微观剩余油分布规律和动用机制研究、不同化学剂的作用机理研究以及化学剂与不同孔喉结构的匹配关系研究等,为化学驱提高采收率机理研究和驱油剂优选提供了研究手段和技术支撑。

3.4 辅助历史拟合软件

历史拟合是油藏数值模拟研究中最核心的技术环节,对研究成果准确度影响大,应用门槛高。在常规人工模拟的过程中,普遍存在拟合时间长、调整效率低、拟合效果差等问题。胜利油田自主研发了以提高效率精度、缩短周期为目标的辅助历史拟合软件^[38]。按照拟合分析流程和可视化需求,设置了模型加载及展示、历史拟合质量评价、参数优化分析和自动历史拟合4部分功能。通过历史拟合质量评价模块建立的拟合质量评价指标体系及评判标准,可快速掌握模型特点,优选适当的拟合目标和拟合策略;运用基于物质平衡方法的参数优化分析模块,可辅助研究人员实现油藏初始参数的自动组合和优化,明确历史拟合调整参数和方向;应用基于SVD分解的多参数最优化调参拟合方法的自动历史拟合模块,可自动修正完善地质模型,提高历史拟合效率3倍以上。

4 面临的挑战和发展趋势

4.1 面临的挑战

胜利油田投产老区已进入高含水为主的开发阶段,剩余油高度分散,单一层系或局部区块规模化挖潜增效的难度日益增大,未动用新区以非常规难动用储量为主,开发机理复杂,对油藏数值模拟精细程度、规模、效率和协作方式等方面提出了更高要求。

科学的开发决策需要提升一体化水平 油气藏开发生产是一个相对独立又相互制约的多节点系统,通常将其分为油气藏、井筒和地面管网3个子系统,传统的单环节模拟更加注重局部最优,而更加科学的开发决策需要开展全局优化,实现生产过程全流程最优。

精细化、规模化要求更高的计算效率 油藏地质模型的复杂精细化、多相低渗流、井类型多样化、网格复杂化等导致出现数值离散的线性方程组系数矩阵规模更大、性态更坏、求解更难、收敛性更差等问题,现有算法无法适配新一代智算超算一体化架构,难以发挥国产超算算力优势进行大规模高精度油藏数值模拟。实现增产、稳产需要更大规模、更加精细的数值模拟计算,对计算资源提出挑战。

开发提质增效需要借助智能提速提效手段 随着老油田开发程度不断加深,高成本和低油价的矛盾进一步凸显,数值模拟作为提高采收率研究的重要手段应用范围不断扩大、深度不断加强,但其研究过程复杂、周期长,不能完全适应现场快速研究的需求,人工智能及大数据技术的快速发展能够提高数值模拟应用研究的效率,使数值模拟的推广应用成为了可能。

4.2 发展趋势

一体化 在高度物联化的数据采集及传输等功能基础上,结合数字化、信息化建设成果,打破生产各个环节间的信息壁垒,进行油气田生产系统数学模型以及各种应用系统的高度一体化整合,实现模拟模型的标准化、数字化,形成软件产品进而达到工业化推广应用,支撑实现油气田生产高效管理。

并行化 发展适应复杂油藏模拟计算模型的国产E级异构计算模式的非线性求解器和千万核级并行算法,实现亿级乃至十亿级节点规模的大规模运算。

智能化 以油藏模型为核心,攻关大数据技术,研发地质建模、油藏模拟、动态分析、方案优化、跟踪应用等关键节点的智能分析工具,实现智能建模、智能模拟、智能优化,推动研究流程提速提效。

5 结论

经过多年的探索和持续研究,胜利油田形成了具有胜利特色的水驱、气驱、化学驱、热采等数值模拟技术系列,“十三五”以来,在发展中升级完善了特高含水期油藏精细数值模拟技术、低渗透压驱流固耦合数值模拟技术、非均相复合驱数值模拟技术、稠油油藏多元热复合驱开发技术、CO₂高压混相驱数值模拟技术和页岩油数值模拟技术,形成了相应的特高含水后期油藏数值模拟软件、化学驱数值模拟软件SLCHEM和微观数值模拟软件,有力支撑了胜利油田油藏开发的机理研究和矿场实施。

面对目前胜利油田老区高含水、挖潜难度大和新区多为非常规、开发机理复杂的难题,油藏数值模拟需要向一体化、并行化、智能化方向发展,为油田开发提质增效提供技术支撑。

参考文献

- [1] 许强,陈燕虎,侯玉培,等.特高含水后期油藏时变数值模拟处理方法研究[J].钻采工艺,2015,38(5):41-43.
XU Qiang, CHEN Yanhu, HOU Yupei, et al. Research on numerical simulation processing mode based on reservoir time varying physical properties and seepage in extra high water cut stage [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(5): 41-43.
- [2] 卜亚辉.基于适配关系的高含水油藏流场调控优化方法[J].断块油气田,2022,29(5):692-697.
BU Yahui. Optimization method of flow field control in high water cut reservoir based on matching relationship [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(5): 692-697.
- [3] 孟立新,任宝生,鞠斌山.断块油藏高含水期水驱规律研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2010,32(6):139-142.
MENG Lixin, REN Baosheng, JU Binshan. Water flooding pattern of fault block oil reservoir in high water-cut stage [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2010, 32(6): 139-142.
- [4] 杨冰,傅强,官敬涛,等.特高含水油藏不同井网流场调整模拟与驱油效率[J].油气藏评价与开发,2023,13(4):519-524.
YANG Bing, FU Qiang, GUAN Jingtao, et al. Oil displacement efficiency based on different well pattern adjustment simulation in high water cut reservoirs [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(4): 519-524.
- [5] 何逸凡,陈建波,马铃峥,等.基于动态残余油饱和度表征的特高含水期油田数值模拟[J].中国海上油气,2022,34(3):105-111.
HE Yifan, CHEN Jianbo, MA Quanzheng, et al. Numerical simulation of oilfield in ultra-high water cut stage based on dynamic residual oil saturation [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(3): 105-111.
- [6] 张大为,闫宝珍,曾照英.注水开发油藏油水相对渗透率变化规律[J].重庆大学学报:自然科学版,2000,23(Z1):77-78.
ZHANG Dawei, YAN Baozhen, ZENG Zhaoying. Variety law of oil-water relative permeability in water-flooding reservoir [J]. Journal of Chongqing University: Science & Technology Edition, 2000, 23(Z1): 77-78.
- [7] 王志章,蔡毅,杨蕾.开发中后期油藏参数变化规律及变化机理[M].北京:石油工业出版社,1999:50-60.
WANG Zhizhang, CAI Yi, YANG Lei. The variation law and mechanism of reservoir parameters in the middle and late stages of development [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 50-60.
- [8] 张翼飞,孙志刚,于春磊,等.压驱过程储层参数的动态变化规律研究[C].西安:2022油气田勘探与开发国际会议论文集,2022.
ZHANG Yifei, SUN Zhigang, YU Chunlei, et al. Study on dynamic variation of reservoir parameters in fracturing-flooding [C]. Xi'an: 2022 International Field Exploration and Development Conference, 2022.
- [9] 张翼飞,杨勇,孙志刚,等.低渗透油藏压驱物理模拟与裂缝定量表征[J].油气地质与采收率,2022,29(4):143-149.
ZHANG Yifei, YANG Yong, SUN Zhigang. Physical simulation of fracturing-flooding and quantitative characterization of fractures in low-permeability oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(4): 143-149.
- [10] BAI M, ELSWORTH D, ROEGIERS J C. Modeling of naturally fractured reservoirs using deformation dependent flow mechanism [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(7): 1185-1191.
- [11] 杨勇,张世明,曹小朋,等.胜利油田低渗透油藏压驱开发技术实践与认识[J].油气地质与采收率,2023,30(6):61-71.
YANG Yong, ZHANG Shiming, CAO Xiaopeng, et al. Practice and understanding of pressure drive development technology for low-permeability reservoirs in Shengli Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(6): 61-71.
- [12] 曹伟东,戴涛,于金彪,等.非均相复合驱数值模拟方法研究与应用[J].石油与天然气地质,2016,37(4):606-611.
CAO Weidong, DAI Tao, YU Jinbiao, et al. A numerical simulation method of heterogeneous combination flooding [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 606-611.
- [13] BAI Baojun, LIU Yuzhang, COSTE J P, et al. Preformed particle gel for conformance control: transport mechanism through porous media [C]. SPE 89468,2007.
- [14] COSTE J P, LIU Y, BAI B, et al. In-depth fluid diversion by pre-gelled particles. Laboratory study and pilot testing [C]. SPE 59362,2000.
- [15] LIU Y, BAI B, SHULER P J. Application and development of chemical-based conformance control treatments in China oil fields [C]. SPE 99641,2006.
- [16] 崔晓红.新型非均相复合驱油方法[J].石油学报,2011,32(1):122-126.
CUI Xiaohong. A study on the heterogeneous combination flooding system [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 122-126.
- [17] 曹绪龙.非均相复合驱油体系设计与性能评价[J].石油学报,2013,29(1):115-121.
CAO Xulong. Design and performance evaluation on the heterogeneous combination flooding system [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 29(1): 115-121.
- [18] 刘刚,曹涵,朱爱国,等.稠油油藏多相协同蒸汽驱物理模拟实验[J].特种油气藏,2023,30(3):131-136.
LIU Gang, CAO Han, ZHU Aiguo, et al. Experiment on physical simulation of multi-phase synergistic steam flooding in heavy oil reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(3): 131-136.
- [19] 孟薇.孤岛油田稠油油层热化学蒸汽驱的数值模拟[J].油气田地面工程,2014,33(11):12-13.
MENG Wei. Numerical simulation of thermochemical steam flooding in heavy oil layer in Gudao oilfield [J]. Surface Engi-

- neering of Oil & Gas Field, 2014, 33(11): 12-13.
- [20] 孟祥兵,孙新革,罗池辉,等.强非均质超稠油SAGD储集层升级扩容数值模拟[J].新疆石油地质,2023,44(2):210-216.
MENG Xiangbing, SUN Xinge, LUO Chihui, et al. Numerical simulation on upgrading and dilation of SAGD ultra-heavy oil reservoirs with high heterogeneity [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(2): 210-216.
- [21] 赵洪岩,葛明曦,张鸿.辽河油田超稠油蒸汽驱技术界限研究与应用[J].特种油气藏,2022,29(2):98-103.
ZHAO Hongyan, GE Mingxi, ZHANG Hong. Research and application of steam flooding technical limit for super heavy oil in Liaohe Oilfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(2): 98-103.
- [22] 姚秀田,徐宏光,张仲平,等.稠油油藏多轮次吞吐阻流环的分布特征及突破开采技术[J].大庆石油地质与开发,2023,42(6):67-74.
YAO Xiutian, XU Hongguang, ZHANG Zhongping, et al. Distribution characteristics and breakthrough production technology of low-restricted ring in multi-rounds huff-and-puff heavy oil reservoir [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42(6): 67-74.
- [23] 杨勇.胜利油田特低渗透油藏CO₂驱技术研究与实践[J].油气地质与采收率,2020,27(1):11-19.
YANG Yong. Research and application of CO₂ flooding technology in extra-low permeability reservoirs of Shengli Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(1): 11-19.
- [24] 鞠斌山,于金彪,吕广忠,等.低渗透油藏CO₂驱油数值模拟方法与应用[J].油气地质与采收率,2020,27(1):126-133.
JU Binshan, YU Jinbiao, LÜ Guangzhong, et al. Numerical simulation method and application of CO₂ flooding in low permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(1): 126-133.
- [25] 陈志豪,郝永卯,季迎春,等.CO₂-原油混相带形成机理与表征方法[J].油气地质与采收率,2020,27(1):57-61.
CHEN Zhihao, HAO Yongmao, JI Yingchun, et al. Formation mechanism and characterization method of CO₂-crude oil miscible zone [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(1): 57-61.
- [26] 李友全,阎燕,于伟杰.利用试井技术确定低渗透油藏CO₂驱替前缘的方法[J].油气地质与采收率,2020,27(1):120-125.
LI Youquan, YAN Yan, YU Weijie. Study on method of determining CO₂ flooding displacement front in low-permeability reservoirs using well testing technology [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(1): 120-125.
- [27] KIM H. A simulation study of gel conformance treatments [D]. Austin: The University of Texas, 1995.
- [28] SHI Juntai, VARAVEI A, CHUN Huh, et al. Viscosity model of preformed microgels for conformance and mobility control [J]. Energy & Fuels, 2011, 25(11): 5 033-5 037.
- [29] 宋道万,孙玉红,戴家林.化学驱数值模拟软件的改进和完善[J].油气采收率技术,2000,7(2):41-44.
SONG Daowan, SUN Yuhong, DAI Jialin. Improvement and perfection of the numerical simulation software of chemical flooding [J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2000, 7(2): 41-44.
- [30] 杨耀忠,鲁统超,戴涛,等.二元复合驱数值模拟隐格式和应用[J].山东大学学报:理学版,2010,45(8):19-26, 35.
YANG Yaozhong, LU Tongchao, DAI Tao, et al. An implicit scheme for a numerical simulation of binary combination flooding and application [J]. Journal of Shandong University: Natural Science, 2010, 45(8): 19-26, 35.
- [31] 戴涛,朱维耀,王小峰,等.炮眼剪切对注入聚合物溶液粘度影响的数学模型[J].油气地质与采收率,2012,19(2):29-32,36.
DAI Tao, ZHU Weiyao, WANG Xiaofeng, et al. Investigation on model for viscosity of polymer solution through perforation [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2): 29-32, 36.
- [32] 戴涛,席开华,戴家林,等.基于毛管数插值的二元驱油藏模拟方法[J].山东大学学报:理学版,2012,47(8):55-59.
DAI Tao, XI Kaihua, DAI Jialin, et al. A method for numerical simulation of binary combination flooding based on interpolation of capillary number [J]. Journal of Shandong University: Natural Science, 2012, 47(8): 55-59.
- [33] 于金彪,席开华,戴涛,等.两相多组分流有限元方法的收敛性[J].山东大学学报:理学版,2012,47(12):19-25.
YU Jinbiao, XI Kaihua, DAI Tao, et al. Convergence of the finite element method for two-phase multi-component flow in porous media [J]. Journal of Shandong University: Natural Science, 2012, 47(12): 19-25.
- [34] 曹伟东.乳液表面活性剂驱数值模拟方法研究与应用[J].油气地质与采收率,2017,24(2):58-62.
CAO Weidong. Method for emulsion surfactant flooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(2): 58-62.
- [35] 曹伟东.泡沫驱数学模型改进[J].山东工业技术,2017,(6):248-249.
CAO Weidong. Improvement of mathematical model of foam flooding [J]. Shandong Industrial Technology, 2017, (6): 248-249.
- [36] 曹伟东,戴涛,于金彪.化学驱数值模拟的IMPIMC方法[J].山东大学学报:工学版,2015,45(1):88-94.
CAO Weidong, DAI Tao, YU Jinbiao. An IMPIMC method for chemical simulation [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2015, 45(1): 88-94.
- [37] CAO Weidong, YANG Danping. Adaptive optimal control approximation for solving a fourth-order elliptic variational inequality [J]. Computers & Mathematics with Applications, 2014, 66(12): 2 517-2 531.
- [38] 于金彪.油藏数值模拟历史拟合分析方法[J].油气地质与采收率,2017,24(3):66-70.
YU Jinbiao. History matching analysis method on reservoir numerical simulation [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(3): 66-70.