

文章编号: 0253-2697(2024)07-1152-11 DOI:10.7623/syxb202407010

综 述

油藏地质建模与数值模拟一体化内涵及发展趋势

计秉玉¹ 张文彪¹ 何应付¹ 段太忠¹ 刘 合²

(1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要:地质建模与油藏数值模拟是现代油藏研究与管理的重要工具,推动建模—数值模拟一体化技术发展与应用对油气藏高效开发具有重要意义。通过阐述建模—数值模拟学科的形成、发展及深度融合的历程,剖析了建模—数值模拟一体化在理念、流程、算法和应用上的内涵,分析了建模—数值模拟一体化关键技术发展趋势。地质建模技术要向地震多信息驱动、多点统计学新算法、地质过程模拟、人工智能技术等方面继续探索;数值模拟技术要更加注重多相多组分多场耦合、物理化学渗流、全油藏一体化模拟、人工智能自动历史拟合等方向的深化研究。提出了实现建模—数值模拟一体化的主要做法,包括搭建一体化软件平台、建立规范流程标准、发挥示范引领作用以及大力培养复合型人才;并认为多维多尺度数据同化、构建油气藏开发大模型以及数字孪生是建模—数值模拟一体化的未来发展趋势。

关键词:建模—数值模拟一体化;地质建模;油藏数值模拟;人工智能;发展趋势

中图分类号:TE19

文献标识码:A

Connotation and development trends of integration between geological reservoir modeling and numerical reservoir simulation

Ji Bingyu¹ Zhang Wenbiao¹ He Yingfu¹ Duan Taizhong¹ Liu He²

(1. Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China;

2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

Abstract: Geological modeling and numerical reservoir simulation are considered as important tools for modern reservoir research and management, and it is of great significance to promote the development and application of modeling and numerical simulation integration technique for efficient exploitation of oil and gas reservoirs. This paper briefly elaborates the formation, development and deep integration of the modeling and numerical simulation disciplines, and also analyzes the connotations of modeling and numerical simulation integration in terms of concept, process, algorithm and application, as well the development trends for key techniques of modeling and numerical simulation integration. At present, geological modeling technique needs to be further explored in terms of seismic multi-information drive, multi-point new statistical algorithm, geological process simulation and artificial intelligence technology; numerical simulation technique should focus more on in-depth studies of multi-phase, multi-component and multi-field coupling, physicochemical porous flow, whole-reservoir integration simulation and AI-based automatic history matching. Main methods for achieving modeling and numerical simulation integration are proposed, including building an integrated software platform, establishing standard procedures and standards, giving play to demonstrative and leading roles and fostering versatile talents. Moreover, it is considered that multi-dimensional and multi-scale data assimilation, construction of big reservoir development model and digital twin will be the future development trends for integrated modeling and numerical simulation.

Key words: modeling-numerical simulation integration; geological modeling; numerical reservoir simulation; artificial intelligence; development trends

引用:计秉玉,张文彪,何应付,段太忠,刘合.油藏地质建模与数值模拟一体化内涵及发展趋势[J].石油学报,2024,45(7):1152-1162.

Cite:Ji Bingyu,ZHANG Wenbiao,HE Yingfu,DUAN Taizhong,LIU He. Connotation and development trends of integration between geological reservoir modeling and numerical reservoir simulation[J]. Acta Petrolei Sinica,2024,45(7):1152-1162.

地质建模和油藏数值模拟是石油工业中重要的学科领域,两大学科伴随着油气田开发的现代化进程而

快速发展^[1-6]。地质建模技术的发展主要依靠从事地质学或地质统计学研究的工作者,目标是量化描述

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFA0702400)、国家自然科学基金项目(No. 52204069)和中国科学院战略先导 A 项目“深层碳酸盐岩油气储层地质建模”(XDA14010204)资助。

第一作者:计秉玉,男,1963年4月生,1999年获中国科学院数学与系统研究院博士学位,现为中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院教授级高级工程师,长期从事油气田开发设计、渗流力学与油藏工程等方面的科研工作。Email:jiby.syky@sinopec.com

通信作者:刘 合,男,1961年3月生,2002年获哈尔滨工程大学博士学位,现为中国石油勘探开发研究院副总工程师、中国工程院院士,长期从事低渗透油气藏增产改造、机采系统提高系统效率、分层注水和井筒工程控制技术等方面的研究。Email:liuhe@petrochina.com.cn

储层空间结构和分布特征,为后续数值模拟建立地质模型,是油气藏开发的关键环节。数值模拟技术主要由油气藏工程人员承担,通过承接建立的三维地质模型,认识油藏流体流动规律,预测剩余油分布和优化开发方案。地质建模与油藏数值模拟在现代化油藏管理中扮演着重要角色,从相互独立到互有侧重再到融为一体,建模—数值模拟一体化的理念与工作模式已得到业界的普遍认同和实践,也推动了各类复杂油气藏的高效开发,但对于建模—数值模拟一体化的内涵、关键技术进展以及发展趋势尚缺乏系统阐述。

鉴于此,笔者团队结合多年的建模—数值模拟理论认识及实践经验,对建模—数值模拟一体化的学科内涵进行了剖析,深入总结了建模—数值模拟关键技术进展,并探讨了一体化的未来发展趋势及实现路径,以期对业界同行有所启示,共同推动建模—数值模拟技术的深化应用。

1 地质建模与油藏数值模拟概述

1.1 地质建模与油藏数值模拟学科发展的历程

油气藏地质建模是指以地质认识为基础,根据已知控制点的资料内插、外推控制点之间及控制点以外的油藏特性,在三维空间表征储层砂体骨架、内部物性参数及流体分布^[7-8]。地质建模综合了地质学、地质统计学、地球物理、岩石物理等多学科内容,其流程和内容逐步完善,逐渐演化成一门学科。

关于地质建模的研究可追溯到 20 世纪 60 年代,法国统计学家 Georges Matheron 在南非工程师 Krige 工作基础上,1963 年发表了“Principles of geostatistics”^[2],阐明了地质统计学概念及原理,是地质统计学建模的奠基之作^[9-10]。储层地质模型研究的热潮则始于 20 世纪 80 年代中后期,1985 年在美国达拉斯召开了第一届国际储层表征技术讨论会,将储层表征(reservoir characterization)定义为“定量的确定储层性质、识别地质信息及空间变化的方法”。油藏描述(reservoir description)或储层表征、储层建模(reservoir modeling)等研究成为 20 世纪 80 年代以来的热门课题,储层地质模型成为储层表征的主要任务,代表性人物包括 Shell 公司的资深油田开发地质学家 Weber、美国得克萨斯大学奥斯汀分校的 Lake 教授及挪威的 Haldorsen 教授。20 世纪 90 年代在英国召开的第 13 届国际沉积学大会将“储层沉积学和建立储层地质模型”列为第一个讨论题目,1991 年的 AAPG 年会将分形和混沌学等新手段应用于油藏研究中,该时期 SPE 关于储层建模方面的文献也逐年增加。

油气藏数值模拟是以渗流力学、数学物理方程和

数值分析为基础,结合油气藏地质和油气藏工程原理,使用计算机求解油藏数学模型,认识油藏流体流动规律,优化开发方案并预测开发指标的一门学科。油气藏数值模拟技术诞生于 1953 年,Bruce 和 Peaceman 等发表了“Calculations of unsteady-state gas flow through porous media”^[11],为数值方法计算油气藏渗流问题开辟了道路。Peaceman 的 *Fundamentals of numerical reservoir simulation*^[12]与 Aziz 等的 *Petroleum reservoir simulation*^[13]是油藏数值模拟的经典之作^[14]。20 世纪 80 年代第一代商业化油藏数值模拟软件(Eclipse、CMG、VIP 等)投入使用。2000 年以后油藏数值模拟已成为油藏开发的关键技术手段,第二代数值模拟软件(tNavigator、Intersect、Nexus 等)面世并得到广泛应用,使数值模拟软件的并行化、一体化性能大幅增强。

1.2 建模—数值模拟一体化融合学科链的形成

地质建模是油藏数值模拟的基础,早期两大学科间相互延伸,侧重点有所区别^[15-22]。地质建模更注重构造特征、储层结构、流体分布的静态认识,油藏数值模拟更加关注不同开发方案下渗流场的动态、开发指标变化和开发方案优化设计。

地质建模作为油藏数值模拟的前处理,早期用于数值模拟的地质模型多数由油藏工程人员建立。随着油气田开发阶段的深入,油气流体在地下的分布状况越来越复杂,油藏数值模拟要求能反映储层非均质性特征的精细地质模型。仅依靠纯粹的地质统计学难以满足储层结构精准模拟的情况,地质建模更强调地质学原理指导下的建模。因此,具备丰富沉积学知识并从事开发地质学专业的人员成为了地质建模方向的中坚力量。

伴随着油气开发工作走向集成化、一体化的运行模式,地质建模与油藏数值模拟的融合力度加大,尤其面临致密油气、页岩油气的高效开发,建模—数值模拟工作协同关系更加紧密,模型迭代频率更高^[23-26]。此外,原有的单一功能专业软件早已无法满足跨学科研究的需求,各大大专业软件服务公司均朝着一体化平台布局,尤其建模—数值模拟一体化软件平台得到空前推广,各个专业模块在同一个软件平台下,共享基础数据和可视化,如 Petrel 建模软件与 Eclipse 数值模拟软件通过 Petrel-RE 模块作为桥梁,实现了建模—数值模拟无缝衔接,逐渐发展为建模—数值模拟一体化的综合研究平台;tNavigator 软件也从最初的以数值模拟为主逐步拓展为建模—数值模拟一体化综合平台。

2 建模—数值模拟一体化的内涵

建模—数值模拟一体化主要指油藏地质建模和油

藏数值模拟的融合,是建模—数值模拟应用价值最大化的必要前提,有必要从理念、流程、技术及应用角度进一步阐述一体化内涵。

2.1 理念上的一体化

理念上的一体化是推动油藏模型在矿场应用的重要前提。三维模型是油气藏描述动、静态信息的综合载体,从油气田勘探评价阶段便可建立早期的地质模型,主要以少量的井资料、地震资料、地质概念认识作为信息输入,此阶段模型的精度不高,包含的动态信息也较少,但反映了地质家的主要观点认识,是概念开发方案设计的重要基础。随着开发阶段的推进及多期井网部署,井资料和生产动态资料逐步丰富,油藏模型逐渐完善,成为开发调整与提高采收率决策的重要基础。按照一体化理念,地质模型的不确定性通过油藏动态历史拟合进行修正,一体化则体现在动态反馈机制,使得油藏认识形成闭环,互为补充,不断迭代修正。

2.2 工作流程与组织上的一体化

工作流程和组织上的一体化是建模—数值模拟高效运行的重要保障。油藏建模—数值模拟工作涉及地质、地球物理、油藏工程、采油工程、地面(海洋)工程等多个学科。从管理流程方面,采用扁平化方式,工作模式一体化,使项目组中各学科人员相互配合,数值模拟团队提前介入,针对具体问题反馈地质模型的需求,建模团队则向后延伸。从技术流程方面,最佳途径是采用网络版一体化软件平台,基于服务器和客户端架构,各个专业团队的数据和成果实时共享,实现同步解释、同步建模、同步数值模拟,从传统的“接力赛”转变为“篮球赛”。

2.3 建模—数值模拟技术上的一体化

合适的网格系统是地质建模与数值模拟成功的基本要素。除结构化矩形网格外,角点网格、非结构化网格的使用日益增多,可以更好地描述油藏非均质性,但也给计算上带来更高的要求。同时,建模阶段网格粗化策略对数值模拟阶段是否适应也是一个重要的方面。因此,在地质建模阶段设计网格系统,应兼顾到以后数值模拟的适应性。

强化基于岩石类型的地质建模技术的应用。岩石类型本身就是地质与油藏物理的结合体,在地质建模阶段,应该从油藏数值模拟需求的观点出发,合理划分岩石类型,使同一岩石类型不仅具有相同的孔隙度与渗透率,也要有相同的相对渗透率曲线与毛细管压力曲线,为后续的高效油藏数值模拟奠定基础。

2.4 应用上的一体化

建模—数值模拟作为油公司的核心技术,已在国

际上得到普遍认可和现场应用,大型的油气藏方案均需要建模—数值模拟进行支撑,包括产能预测、经济评价、风险分析、方案优化等,真正实现了“无模型、不方案”的应用价值最大化。中国随着油藏建模—数值模拟技术的逐步成熟,在各大油田的一体化应用也得到快速发展,从最初的三维模型仅用于评估地质储量或作为展示效果,到现今已在常规油气藏及非常规油气藏实现了“基于地质甜点的地质模型布井(包括井轨迹优化设计),基于开发指标预测的油藏数值模拟选井”的综合应用,使模型的价值逐步体现。

随着中国各大油气藏模型的全覆盖及“透明油气藏”理念的提出,油气藏模型的使用价值愈加凸显,各油公司也逐渐将建模—数值模拟数据体作为资产进行规范管理。如大庆油田有限责任公司完成了喇萨杏油田全覆盖,有效实现了集成化油藏管理;中国石油化工股份有限公司西北油田分公司针对塔河油田缝洞型油藏模型开展全覆盖工作,并对入库的油藏模型制定了标准和质量控制要求,随着模型的普及应用,建模—数值模拟一体化也将全面展开。

3 建模—数值模拟关键技术发展方向

3.1 地质建模关键技术发展方向

油气藏地质建模在早期以确定性建模和两点地质统计学建模技术为主,支撑了大量的矿场实践应用,之后逐步发展了多点地质统计学建模技术,引起了学术界及工业界的积极探索。近年来,随着计算能力的迭代升级,地质过程模拟技术以及人工智能建模技术的发展异军突起(图1)。

3.1.1 地震信息驱动的地质建模技术

地震资料驱动地质建模主要包括两种形式:①基于地震属性提取或反演直接得到地震“雕刻体”,作为储层建模的对象,赋予地质含义建立储层模型。如缝洞型储集体由于具有测井数据稀少和极强的非均质性特点,使统计学建模技术的适用性较差,目前普遍采用先分类地震预测、再逐步融合的思路进行地质建模^[27]。②以地震数据生成概率体,作为软数据通过协同 Kriging 方法与井点数据联合求解得到模拟结果,或者在少井条件下通过地震信息求取变差函数,弥补井信息的不足。

大量实践表明,结合地震资料开展储层地质建模能够大大降低地质模型的不确定性,有利于提高储层地质建模的精准度。未来需要从整合地震多属性,尤其是结合深度学习方面开展研究;四维地震信息是逐步提高油藏模型准确度的重要举措,目前已有一些探索^[28],但仍需要进一步发展完善。

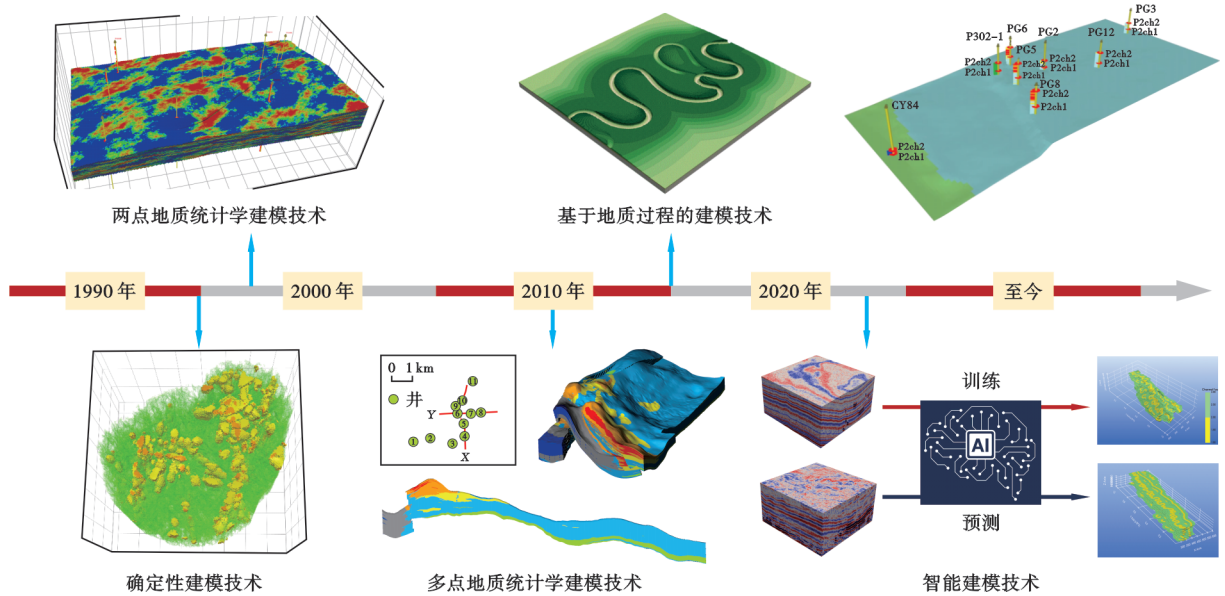


图1 地质建模关键技术发展趋势

Fig. 1 Development trends of key geological modeling technology

3.1.2 多点地质统计学地质建模新方法

在两点地质统计学基础之上发展的多点地质统计学,试图突破变差函数的一些应用弊端,通过训练图像达到理想的建模输入条件。经过30多年的发展,在训练图像获取及多点算法研发方面均取得了较好的进展^[29]。

训练图像的建立方式更趋向于三维化、智能化。训练图像的获取方式从传统的手工绘制、地震属性或卫星照片提取等二维分析技术,逐步发展为数字露头、地质过程模拟等三维技术。近几年发展迅速的无人机倾斜摄影技术加强了数字露头大视域、宽角度的采集,其高分辨率数据可识别沉积层理构造,再结合钻孔标定信息,构建起高精度的“2.5”维数字化地质露头,是最佳训练图像来源之一。另外,地质过程模拟也是建立三维训练图像的有效途径^[30-31],通过不同的地质条件产生各类可能的沉积学模型,可直接用作训练图像。

多点建模算法主要包含基于概率和基于样式两大类。基于概率的多点算法运算效率较高,最早投入到商业建模软件中进行应用,但其对模拟目标的连续性和形态保持程度稍差,目前主要依靠增加地震信息约束提高其模拟准确度;基于样式的多点算法主要考虑距离大小及样式的相似性,具有保持地质目标形态的优势,但从运算效率和样式完整性上受到一定限制。为进一步提升多点建模的效率和效果,目前主要从训练图像搜索方式及采样方式进行改进,如考虑储层的方向、规模、叠置关系等,基于序列的多点建模算法是未来较有发展潜力的方法之一^[32]。

3.1.3 基于地质过程的地质建模技术

基于数据统计的建模效果受井资料的丰富程度、

地震资料的分辨率等因素控制,需要足够丰富的资料才能保证建模的效果。随着油气勘探开发领域逐步走向深层、深海,稀井高产模式较为普遍,有限的井资料难以满足统计学建模的需求,需要考虑通过地质过程认识弥补钻井数据缺失的问题,也就是从数据驱动向过程驱动地质建模技术发展。

地质过程模拟技术强调从正演的角度再现储层的形成过程,融入了沉积学机理以及专家经验。对于碎屑岩储层或碳酸盐岩沉积型储层,目前已有较为成熟的商业软件(如Dionisos、Delft3D等)开展沉积过程模拟,可以建立百万年尺度的地层模型。中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院地质建模团队针对碳酸盐岩地层沉积地质过程,创建了集生产模型、能量分布模型及搬运模型于一体的沉积正演数值模拟新方法^[29-30]。随着沉积学认识的深入和计算技术快速发展,基于地质过程的地质建模技术将成为一个重要方面。

3.1.4 大数据训练样本构建及人工智能建模技术

地质建模技术涉及多学科融合,以及跨尺度、跨维度的数据整合,目前已有的深度学习算法尚难完全符合地质建模技术的需求。当前应用较多的条件化生成对抗网络(CGAN)主要是通过一种图像映射的方式^[33-36],实现从已知到未知的预测,但该方法对训练样本的需求较高,而海量的训练样本获取恰是地学领域的短板。学者们通过搭建地质知识库,采用信息化手段收集各类地质模式,为深度学习地质建模提供基础,补足短板。如中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院针对塔里木盆地顺北5号带南段深层断控缝

洞型等储层,通过过程模拟生成大量符合地质规律的地质模型作为训练样本,开展基于深度学习的建模并取得初步效果^[37-39]。总之,以深度学习为标志的地质建模技术方兴未艾。

3.2 数值模拟关键技术发展方向

随着油藏类型日趋复杂,以及网格剖分、数值计算、人工智能、计算机和互联网技术的发展,油藏数值模拟技术呈现图2所示的发展趋势。

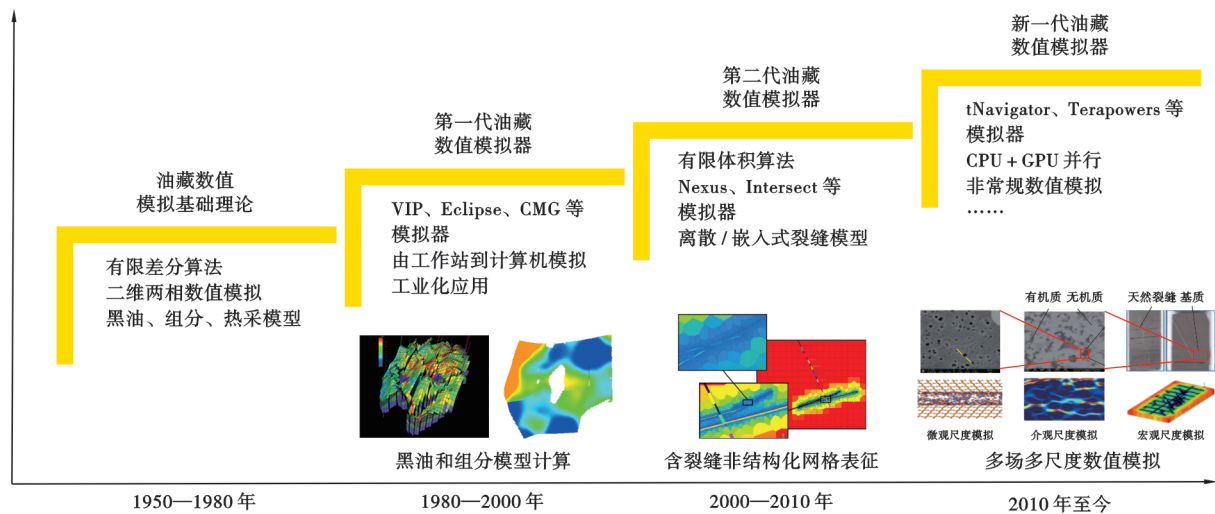


图2 油藏数值模拟技术发展趋势

Fig. 2 Development trends of reservoir numerical simulation techniques

3.2.1 多相多组分多场耦合数值模拟方法

近年来新发现的地质储量多赋存在致密或页岩储层中,一般具有超低孔渗、孔隙类型多样、烃类赋存方式多样、传质机制复杂、相变剧烈、启动压力梯度、应力敏感、吸附、扩散、滑脱等特征^[40-41],再加上水平井多级压裂生产模式^[42-43]及其裂缝时变^[41]效应,必须强化储层地质力学研究,发展多场多尺度耦合非常规油气藏数值模拟方法和工业软件^[44-47]。主要包括微米—纳米级孔隙内复杂流体相态模拟方法、嵌入式离散裂缝及多尺度裂缝耦合技术、压后缝网自动构建技术、非线性渗流数值模拟方法、渗流场与应力场耦合模拟方法、物性时变数值模拟方法、基于并行的高速求解技术等。

随着未来国家绿色低碳战略的实施,CO₂驱油埋存必然发挥重要作用^[48]。CO₂驱油封存过程中不仅涉及CO₂与原油间剧烈的相互作用(溶解、扩散、萃取、甚至固相沉积),还涉及CO₂—水—岩石的相互作用及其对储层、盖层的影响^[49-51]。这种影响既导致储层孔、渗物性变化,也会使得储层、盖层应力结构发生改变,对CO₂驱油效果和封存安全性带来影响。因此,CO₂驱油封存数值模拟需要发展渗流场—化学场—应力场耦合模拟方法,主要包括复杂流体相态模拟技术、多相多组分油藏数值模拟技术、非完全混相驱数值模拟技术、水岩反应数值模拟技术、全地层数值模拟技术、CO₂封存安全性数值模拟技术等。

3.2.2 物理化学渗流数值模拟方法

半个世纪以来,聚合物及各类化学复合驱^[52]、稠油热、剂、汽复合驱及化学复合冷采^[53]等提高采收率技术发展迅速。由于多种化学组分共同存在,其与地层流体(可能存在非牛顿流体^[54])和岩石接触,不仅发生传质传热,还会发生复杂的物理化学作用,使得渗流理论和数学模型非常复杂,其求解方法超出了经典渗流力学方法的范畴,需要发展新一代物理化学渗流数值模拟方法和工业软件^[55-57]。

3.2.3 油藏—井筒—地面一体化数值模拟方法

油藏—井筒—管网一体化耦合模拟能同时反映油藏渗流特征,井筒流动和管网集输特征,对准确预测生产态势,实现生产系统整体流程优化具有重要意义。

随着特低渗、致密页岩、低产、低丰度等边际油田的开发逐步得到重视,水平井、多分支井、多级压裂水平井等复杂结构井^[58]成为老油田挖潜增产和新油田经济有效开发的重要技术,而较长水平段摩阻较大,各部位产液差别较大。同时,在实际油田开发作业中,通常会遇到多个油气藏(同类型或不同类型)利用同一套生产管网进行联合开发的情况。在这种情况下,油藏与管网和各油藏之间都会存在相互影响和制约,需要更专业的多油藏一体化数值模拟技术。

油藏井筒地面一体化模拟中涉及油藏—井筒耦合模拟方法^[59]、井筒管网模型建立方法^[60]、流体多相管流模拟方法、油藏渗流方程与地面管网流动方程隐式

求解方法、一体化优化方法等,目前还需要进一步加强攻关研究。

3.2.4 全油藏整体精细数值模拟技术

在传统的数值模拟研究中,由于计算能力有限,通常需要对精细地质模型进行粗化,从而导致对空间认识的“损失”,形成了“定性尚可、定量不足”的现象。为了满足对油藏开发生态的深入把控,满足油气藏地质特征的细致刻画,以及对流体分布、运移规律的准确描述,需要基于精细的地质模型进行数值模拟^[61-65]。

随着大容量高性能计算机的出现,使全油田(油藏)整体精细模拟成为可能。同时,超长水平井、复杂完井方式以及大型全区水力压裂已成为常用的开发技术,传统的井组模拟或以断层为边界的模拟无法考虑储层空间上的不连续性和非均质性。为了更准确地分析剩余油,制定油田开发技术政策,大规模全油藏整体模拟是油藏模拟发展的必然趋势,也是目前模拟技术发展的重点。

并行计算技术被认为是加速大型复杂计算问题求解过程的有效途径,能够满足油藏大规模精细模拟的要求。目前,主要的商用油藏模拟软件都是通过改善方程求解的方法,采用域分解并进行分布式并行计算的方式来提高计算效率。如沙特阿拉伯国家石油公司在2010年突破了10亿网格规模的模拟(Gigapowers),并在2016年利用150000个计算核心实现了万亿网格规模的模拟(Terapower)。国际上突破10亿网格规模的储层模拟器主要有Intersect、Gigapowers、Terapowers、Echelon、tNavigator等。近年来,随着GPU技术的快速发展,油藏数值模拟越来越重视GPU加速技术的应用,多核CPU+GPU集群的混合并行加速技术已经成为油藏数值模拟发展的重要方向^[66-71]。

3.2.5 油藏数值模拟中的人工智能方法

人工智能在油藏数值模拟中的主要应用体现在:①自动历史拟合方面,如Eclipse、Intersect、tNavigator等软件均利用机器学习、最优化等人工智能方法进行自动历史拟合。近年来,基于深度学习的数据驱动历史拟合方法^[72-74]快速发展,但还没有起到替代专家的作用,需要在数据驱动与模型驱动相结合方面进一步开展研究。②开发方案的优化方面^[75],运用粒子群算法、进化算法等智能优化算法对井位井别、工作制度等方面进行了大量探索,同时应用机器学习生成代理模型,加速油藏模拟过程。

有些学者开发了将内部数值模拟程序包和基于人工神经网络的专家系统相结合的神经模拟协议,建立了神经网络模拟工作流程,以允许专家系统使用数值

模拟模型生成的数据自动更新其知识库^[76]。随着人工智能的发展,数值模拟软件可以实现用户只需提供描述物理系统、流体和历史的数据,不必指定计算数据,如算法选择、迭代参数和时间步长控制,自动生成油藏模拟网格。

4 建模—数值模拟一体化实现路径及前沿展望

4.1 建模—数值模拟一体化实现路径

4.1.1 建设一体化集成平台

将三维地质建模和油藏数值模拟整合至一个软件平台是实现建模—数值模拟一体化的重要手段,Petrel是较早实现建模—数值模拟一体化的软件平台之一,tNavigator近几年也补充了建模模块且实现了统一底层平台的数据共享,中国石油天然气集团有限公司的HiSim软件从设计之初便考虑了建模—数值模拟一体化运行,中国石油化工股份有限公司的COMPASS数值模拟软件也在逐步整合建模模块和压裂模拟模块。将三维地质建模和油藏数值模拟整合至一个平台能够极大提高地质—工程一体化研究效率,也有利于采用数值模拟结果反向优化地质建模参数,包括构造、断层、储层参数、油气水界面、相对渗透率等。

4.1.2 深化工作流程与规范标准

在现有三维地质建模、油藏数值模拟行业和企业标准的基础上,根据建模—数值模拟一体化技术的特点,建立不同类型油藏建模—数值模拟一体化工作流程和规范标准,提高建模—数值模拟一体化的工作效率,提升一体化研究成果的精细化、科学化,同时也有利于建模—数值模拟一体化技术的推广应用。

4.1.3 发挥示范引领作用

在技术发展和项目研究中推进和实施一批具有导向性、示范性、引领性作用的建模—数值模拟一体化项目。在典型项目研究过程中,注重研究细节,严把项目质量,确保一体化研究成果更符合矿场实际,具备“可视化、量化、精准化”。同时,通过以点带面,提高中国建模—数值模拟一体化研究水平,加大建模—数值模拟一体化应用力度。

4.1.4 培养复合型人才

集成平台是建模—数值模拟一体化的基础,培养多学科复合型人才是建模—数值模拟一体化技术发展和应用的关键。人才是建模—数值模拟一体化技术的创造者、传播者和应用者,只有加大多学科复合人才培养才能保障更好的建设一体化集成平台,才能更好地发挥一体化作用。人才培养要坚持实践导向,建设一支创新能力突出、善于解决复杂技术问题的人才队伍。

4.2 建模—数值模拟一体化技术前沿展望

油气开采对象日趋复杂性以及信息技术尤其是人工智能技术的快速发展是建模—数值模拟一体化技术发展的主要驱动力。

4.2.1 多维多尺度大数据同化

数据同化最初来源于数值天气预报,目前已广泛应用于地球科学领域。数据同化是指在考虑数据时空分布以及观测场和背景场误差的基础上,在数值模型的动态运行过程中融合新的观测数据的方法^[77-80]。其是通过不断融合时空上不同来源和不同分辨率的直接或间接观测信息来自动调整模型,改善模型估计精度,提高模型预测能力。目前人工智能技术的发展为数据同化提供了更好的平台,机器学习和深度学习可以快速处理海量数据,实现多维多类数据的统一化,并从中提取有用信息,预测未来的趋势。在油气藏开发领域,人工智能可以整合地质数据、工程数据、生产数据、经济数据等,提供一个全面的油田视图,从而更准确地预测储层特性、优化开发方案和提高生产效率。如当前中国东部老油田经过数十年的开发,积累了海量的各种动静态数据、多维多尺度数据,通过这些数据的同化和人工智能技术,可更加深入认识油藏,快速实现开发生产的自动优化,且随着大数据的逐步积累,预测与控制精准度越来越高,是建模—数值模拟一体化重要发展趋势之一。

4.2.2 构建油气藏开发大模型

随着人工智能技术的不断发展,OpenAI的GPT、百度的文心一言等大语言模型在自然语言处理领域取得了显著进展,成为当前研究的热点之一^[74],工业大模型也在蓬勃发展^[81-85]。油气藏开发大模型属于工业大模型的一类,基于高性能计算和人工智能,充分利用各种地质数据、油藏数据、工程数据、开发动态数据建立大模型,构建具有知识管理功能的生成式网络,不断提高大模型的实时性、泛化性,不断提高复杂储层结构的预测、剩余油监测、开发调整与采收率措施优化能力。油气藏开发大模型的建立与发展将会对大幅度提高油气藏开发水平起到革命性促进作用,成为建模—数值模拟一体化的一个重要方面。

4.2.3 面向智慧油田的数字孪生

数字孪生主要是要创建和物理实体等价的虚拟体或数字模型,从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程^[86-88]。数字孪生可以在众多领域应用,中国应用较深入的是工程建设智能制造领域,能够依据采集的物理实体的运行数据完善虚拟体的仿真分析算法,从而对物理实体的后续物理产品运行和改进提供更加精确的决策^[89]。在油气藏开发领域,开采对象越来越

复杂,认识与决策的实时性需求更为突出,更需要采用数字孪生的理念与技术,实现油藏模型与油藏实体的同步映射,及时预警,及时优化控制各种措施。一体化的油藏建模与数值模拟已经为数字孪生打下良好基础,随着传感监测技术的发展,算力的提升和人工智能算法的不断进步,可期实现油气藏数字孪生,建成智慧油田。

5 结 论

(1) 地质建模与数值模拟一体化的理念已逐步形成,建模—数值模拟一体化的内涵包括理念上的一体化、流程上的一体化、建模—数值模拟技术上的一体化以及应用上的一体化等方面。

(2) 油气藏地质建模技术向多点统计、地质过程、人工智能等方向发展,数值模拟技术更面向多相多组分多场耦合、非常规油气藏数值模拟新方法等方面发展,智能化是建模—数值模拟一体化高效融合的重要发展方向。

(3) 建设一体化工作平台、制定流程规范标准、打造示范引领项目、培养复合型人才是推动建模—数值模拟一体化的关键路径。

(4) 随着大数据与人工智能技术的快速发展,数据同化、开发油气藏大模型及数字孪生是引领未来建模—数值模拟一体化的重要前沿。

参 考 文 献

- [1] KRIGE D G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1951, 52(6): 119-139.
- [2] MATHERON G. Principles of geostatistics[J]. Economic Geology, 1963, 58(8): 1246-1266.
- [3] JOURNEL A G. Geostatistics for conditional simulation of ore bodies[J]. Economic Geology, 1974, 69(5): 673-687.
- [4] JOURNEL A G, HUIJBREGTS C J. Mining geostatistics[M]. New York: Academic Press, 1978.
- [5] Houlding S W. 3D Geoscience modeling: computer techniques for geological characterization [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1994: 1-2.
- [6] JOURNEL A G. Conditional simulation of geologically averaged block permeabilities[J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(1/2): 23-35.
- [7] DEUTSCH C V, TRAN T T. FLUVSIM: a program for object-based stochastic modeling of fluvial depositional systems[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(4): 525-535.
- [8] DEUTSCH C V. Geostatistical reservoir modeling[J]. Computers & Geosciences, 2002, 29(1): 113-113.
- [9] JOURNEL A G. Combining knowledge from diverse sources: an

- alternative to traditional data independence hypotheses [J]. *Mathematical Geology*, 2002, 34(5): 573-596.
- [10] HARBAUGH J W. Mathematical simulation of marine sedimentation with IBM 7090/7094 computers[M]//MERRIAM D F. Computer contributions 1. Lawrence, Kansas: The University of Kansas, 1966.
- [11] BRUCE G H, PEACEMAN D W, RACHFORD H H, et al. Calculation of unsteady-state gas flow through porous media[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1953, 5(3): 79-92.
- [12] PEACEMAN D W. Fundamentals of numerical reservoir simulation[M]. New York: Elsevier Scientific Pub. Co., 1977.
- [13] AZIZ K, SETTARI A. Petroleum reservoir simulation[M]. London: Applied Science Publishers Ltd., 1979.
- [14] KENDALL C G S C, LERCHE I, NAKAYAMA K. Simulation of continental margin sedimentation[C]// American Association of Petroleum Geologists annual meeting. Atlanta: AAPG, 1986.
- [15] 裘亦楠. 石油开发地质方法论(一)[J]. *石油勘探与开发*, 1996, 23(2): 43-47.
- QIU Yanan. The methodology of petroleum development geology (I)[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1996, 23(2): 43-47.
- [16] 裘怿楠, 贾爱林. 储层地质模型 10 年[J]. *石油学报*, 2000, 21(4): 101-104.
- QIU Yanan, JIA Ailin. Development of geological reservoir modeling in past decade[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(4): 101-104.
- [17] 贾爱林, 郭智, 郭建林, 等. 中国储层地质模型 30 年[J]. *石油学报*, 2021, 42(11): 1506-1515.
- JIA Ailin, GUO Zhi, GUO Jianlin, et al. Research achievements on reservoir geological modeling of China in the past three decades[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(11): 1506-1515.
- [18] 胡向阳, 熊琦华, 吴胜和. 储层建模方法研究进展[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2001, 25(1): 107-112.
- HU Xiangyang, XIONG Qihua, WU Shenghe. Advancement of reservoir modeling methods[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2001, 25(1): 107-112.
- [19] 吴胜和. 储层表征与建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- WU Shenghe. Reservoir characterization & modeling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [20] 李阳, 吴胜和, 侯加根, 等. 油气藏开发地质研究进展与展望[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(4): 569-579.
- LI Yang, WU Shenghe, HOU Jiagen, et al. Progress and prospects of reservoir development geology[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(4): 569-579.
- [21] 于兴河. 油气储层表征与随机建模的发展历程及展望[J]. *地学前缘*, 2008, 15(1): 1-15.
- YU Xinghe. A review of development course and prospect of petroleum reservoir characterization and stochastic modeling[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(1): 1-15.
- [22] 王文龙, 尹艳树. 储层建模研究进展及发展趋势[J]. *地质学刊*, 2017, 41(1): 97-102.
- WANG Wenlong, YIN Yanshu. Research progress and trend of reservoir modelling[J]. *Journal of Geology*, 2017, 41(1): 97-102.
- [23] 乔占峰, 沈安江, 郑剑锋, 等. 基于数字露头模型的碳酸盐岩储集层三维地质建模[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(3): 328-337.
- QIAO Zhanfeng, SHEN Anjiang, ZHENG Jianfeng, et al. Three-dimensional carbonate reservoir geomodeling based on the digital outcrop model [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(3): 328-337.
- [24] 尹艳树, 张昌民, 李少华, 等. 一种基于沉积模式的多点地质统计学建模方法[J]. *地质论评*, 2014, 60(1): 216-221.
- YIN Yanshu, ZHANG Changmin, LI Shaohua, et al. A pattern-based multiple point geostatistics method[J]. *Geological Review*, 2014, 60(1): 216-221.
- [25] 林承焰, 李辉, 任丽华, 等. 致密砂岩储层天然裂缝建模方法研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(5): 1803-1814.
- LIN Chengyan, LI Hui, REN Lihua, et al. Review of natural fracture modeling methods in tight sandstone reservoirs[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(5): 1803-1814.
- [26] 刘文岭. 地震约束储层地质建模技术[J]. *石油学报*, 2008, 29(1): 64-68.
- LIU Wenling. Geological modeling technique for reservoir constrained by seismic data[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(1): 64-68.
- [27] 赵巍, 张文彪, 李蒙, 等. 四维地震驱动的深海浊积岩油藏地质模型更新方法及应用: 以安哥拉 PU 油田为例[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(4): 301-308.
- ZHAO Wei, ZHANG Wenbiao, LI Meng, et al. Updating and application for a reservoir geological model of deep-water turbidites: a case study of a 4D seismic survey from the PU oilfield in Angola[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(4): 301-308.
- [28] 黄渊, 段太忠, 樊太亮, 等. 塔河地区寒武纪碳酸盐岩台地沉积演化史与成因机制——来自地层沉积正演模拟的启示[J]. *石油学报*, 2022, 43(5): 617-636.
- HUANG Yuan, DUAN Taizhong, FAN Tailiang, et al. Depositional evolution history and formation mechanism of Cambrian carbonate platforms in Tahe area: insights from stratigraphic forward modelling[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(5): 617-636.
- [29] 段太忠, 王光付, 廉培庆, 等. 油气藏定量地质建模方法与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
- DUAN Taizhong, WANG Guangfu, LIAN Peiqing, et al. Method and application of quantitative geological modeling for oil and gas reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.
- [30] 段太忠, 张文彪, 何治亮, 等. 塔里木盆地顺北油田超深断溶体深度学习地质建模方法[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 203-212.
- DUAN Taizhong, ZHANG Wenbiao, HE Zhiliang, et al. Deep learning-based geological modeling of ultra-deep fault-karst reservoirs in Shunbei oilfield, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 203-212.
- [31] 何治亮, 马永生, 朱东亚, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层理论技术进展与攻关方向[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 533-546.
- HE Zhiliang, MA Yongsheng, ZHU Dongya, et al. Theoretical and

- technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 533-546.
- [32] 张文彪,段太忠,赵华伟,等. 断控岩溶体系空间结构差异性与三维建模—以顺北1号断裂带为例[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(28): 12094-12108.
- ZHANG Wenbiao, DUAN Taizhong, ZHAO Huawei, et al. Hierarchical characteristics and 3D modeling of fault-controlled paleokarst systems; a case study of Shunbei 1 strike-slip fault zone[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(28): 12094-12108.
- [33] DEUTSCH C V, WANG Libing. Hierarchical object-based stochastic modeling of fluvial reservoirs[J]. *Mathematical Geology*, 1996, 28(7): 857-880.
- [34] 刘彦锋,张文彪,段太忠,等. 深度学习油气藏地质建模研究进展[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(4): 235-241.
- LIU Yanfeng, ZHANG Wenbiao, DUAN Taizhong, et al. Progress of deep learning in oil and gas reservoir geological modeling[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(4): 235-241.
- [35] 田启川,王满丽. 深度学习算法研究进展[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(22): 25-33.
- TIAN Qichuan, WANG Manli. Research progress on deep learning algorithms[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(22): 25-33.
- [36] SAIKIA P, BARUAH R D, SINGH S K, et al. Artificial neural networks in the domain of reservoir characterization; a review from shallow to deep models[J]. *Computers & Geosciences*, 2020, 135: 104357.
- [37] ZHANG Tuanfeng, TILKE P, DUPONT E, et al. Generating geologically realistic 3D reservoir facies models using deep learning of sedimentary architecture with generative adversarial networks[J]. *Petroleum Science*, 2019, 16(3): 541-549.
- [38] SONG Suihong, MUKERJI T, HOU Jiagen. Geological facies modeling based on progressive growing of generative adversarial networks (GANs)[J]. *Computational Geosciences*, 2021, 25(3): 1251-1273.
- [39] 徐静,霍春亮,李军,等. 建模数模一体化方法表征 BN 油田剩余油分布[J]. *石油地质与工程*, 2017, 31(5): 61-65.
- XU Jing, HUO Chunliang, LI Jun, et al. Characterization of the residual oil distribution in BN oilfield by integrating modeling and numerical simulation[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2017, 31(5): 61-65.
- [40] 李彦泽,段彬,商琳,等. 特低渗、致密油藏非线性渗流数值模拟方法及其在冀东油田的应用[J]. *大庆石油地质与开发*, 2022, 41(6): 153-158.
- LI Yanze, DUAN Bin, SHANG Lin, et al. Numerical simulation method and its application for nonlinear flow in ultra-low permeability and tight oil reservoir in Jidong oilfield[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41(6): 153-158.
- [41] 朱争,贾自力,刘滨,等. 考虑启动压力梯度与裂缝时变性的特低渗油藏数值模拟[J]. *中国海上油气*, 2021, 33(4): 78-84.
- ZHU Zheng, JIA Zili, LIU Bin, et al. Numerical simulation of ultra-low permeability reservoir considering start-up pressure gradient and fracture time variation[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(4): 78-84.
- [42] MOINFAR A, VARAVEI A, SEPEHRNOORI K, et al. Development of an efficient embedded discrete fracture model for 3D compositional reservoir simulation in fractured reservoirs[J]. *SPE Journal*, 2014, 19(2): 289-303.
- [43] 邓英豪,夏阳,金衍. 基于扩展有限元的离散缝网渗流数值模拟方法[J]. *石油学报*, 2022, 43(10): 1474-1486.
- DENG Yinghao, XIA Yang, JIN Yan. Numerical simulation method of discrete fracture network flow based on the extended finite element method[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(10): 1474-1486.
- [44] 张东旭,张烈辉,唐慧莹,等. 致密油多级压裂水平井流-固全耦合产能数值模拟[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(2): 338-347.
- ZHANG Dongxu, ZHANG Liehui, TANG Huiying, et al. Fully coupled fluid-solid productivity numerical simulation of multi-stage fractured horizontal well in tight oil reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(2): 338-347.
- [45] 唐慧莹,罗山贵,梁海鹏,等. 考虑气水两相流动的页岩气井压裂生产一体化数值模拟[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(3): 597-607.
- TANG Huiying, LUO Shangui, LIANG Haipeng, et al. Integrated numerical simulation of hydraulic fracturing and production in shale gas well considering gas-water two-phase flow[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(3): 597-607.
- [46] 湛文涛,赵辉,饶翔,等. 基于连接元法的多尺度裂缝性油藏数值模拟[J]. *力学学报*, 2023, 55(7): 1570-1581.
- ZHAN Wentao, ZHAO Hui, RAO Xiang, et al. Numerical simulation of multi-scale fractured reservoir based on connection element method[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(7): 1570-1581.
- [47] EDWARDS D A, GUNASEKERA D, MORRIS J, et al. New generation of reservoir simulation[J]. *New Technology of Oilfield*, 2011, 23(4): 4-15.
- [48] HE Yingfu, LI Bingyu, YANG Shu, et al. Water-rock-CO₂ interactions and CO₂ storage of Honghe tight oil reservoirs: an experimental and simulation study[J]. *Greenhouse Gases Science and Technology*, 2019, 9(4): 703-718.
- [49] MOUALLEM J, ARIF M, MAHMOUD M. Numerical simulation of CO₂ mineral trapping potential of carbonate rocks[R]. *SPE 214162*, 2023.
- [50] YUAN Kun, BELLO O. Use of computational fluid dynamics model for evaluating performance of high pressure, high temperature wells[R]. *SPE 167896*, 2014.
- [51] 赵辉,刘邓,宋本彪,等. 基于数据空间反演的油藏实时生产优化方法[J]. *石油学报*, 2022, 43(1): 67-74.
- ZHAO Hui, LIU Deng, SONG Benbiao, et al. Optimization method for real-time reservoir production based on data space inversion[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1): 67-74.
- [52] 张健,李宜强,李先杰,等. 渤海油田非连续化学驱提高采收率机理[J]. *石油学报*, 2024, 45(6): 988-998.
- ZHANG Jian, LI Yingqiang, LI Xianjie, et al. Mechanism of en-

- hanced oil recovery by discontinuous chemical flooding in Bohai oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(6): 988-998.
- [53] 王救邦, 杨胜来, 李帅, 等. 高凝油油藏水-油-固多相渗流规律[J]. *石油学报*, 2023, 44(7): 1129-1139.
- WANG Mibang, YANG Shenglai, LI Shuai, et al. Water-oil-solid multi-phase flow law of high-pour-point oil reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(7): 1129-1139.
- [54] SUN Fujie, ZHANG Xiansong, KANG Xiaodong, et al. Numerical simulation studies on development of an offshore heavy oil field by early-stage chemical flooding[R]. *SPE* 157925, 2012.
- [55] DANG C, NGHIEM L, NGUYEN N, et al. Modeling of CoSolvent Assisted Chemical Flooding for enhanced oil recovery in heavy oil reservoirs[R]. *SPE* 190196, 2018.
- [56] ZHAO Yang, YIN Shize, SERIGHT R S, et al. Enhancing heavy-oil-recovery efficiency by combining low-salinity-water and polymer flooding[J]. *SPE Journal*, 2021, 26(3): 1535-1551.
- [57] 计秉玉. 对油气藏工程研究方法发展趋势的几点认识[J]. *石油学报*, 2020, 41(12): 1774-1778.
- JI Bingyu. Some understandings on the development trend in research of oil and gas reservoir engineering methods[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(12): 1774-1778.
- [58] 卢海龙, 尚世龙, 陈雪君, 等. 天然气水合物开发数值模拟器研究进展及发展趋势[J]. *石油学报*, 2021, 42(11): 1516-1530.
- LU Hailong, SHANG Shilong, CHEN Xuejun, et al. Research progress and development direction of numerical simulator for natural gas hydrate development[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(11): 1516-1530.
- [59] SAGEN J, ØSTENSTAD M, HU B, et al. A dynamic model for simulation of integrated reservoir, well and pipeline system[R]. *SPE* 147053, 2011.
- [60] 刘伟, 赵辉, 雷占祥, 等. 基于单井敏感性局域化 EnKF 的油藏辅助历史拟合方法[J]. *石油学报*, 2019, 40(6): 716-725.
- LIU Wei, ZHAO Hui, LEI Zhanxiang, et al. Reservoir assisted history matching method using a local ensemble Kalman filter based on single-well sensitivity region[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(6): 716-725.
- [61] 周贤文, 汤达幘, 张春书. 精细油藏数值模拟研究现状及发展趋势[J]. *特种油气藏*, 2008, 15(4): 1-6.
- ZHOU Xianwen, TANG Dazhen, ZHANG Chunshu. Present situation and growing tendency of detailed reservoir simulation technique[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2008, 15(4): 1-6.
- [62] 匡铁. 超大规模油藏数值模拟技术[J]. *大庆石油地质与开发*, 2018, 37(4): 62-64.
- KUANG Tie. Numerical simulation for super large-scale oil reservoirs[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2018, 37(4): 62-64.
- [63] 魏舒, 李凌宇, 刘芳, 等. 精细油藏数值模拟研究现状及发展趋势探讨[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2021, 41(24): 78-79.
- WEI Shu, LI Lingyu, LIU Fang, et al. Current status and development trends of fine reservoir numerical simulation research[J]. *China Petroleum and Chemical Standards and Quality*, 2021, 41(24): 78-79.
- [64] 袁子昊. 基于 EnKF 和 ES-MDA 的油藏自动历史拟合[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- YUAN Zihao. Automatic reservoir history-matching method based on EnKF and ES-MDA[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [65] 闫霞, 张凯, 姚军, 等. 油藏自动历史拟合方法研究现状与展望[J]. *油气地质与采收率*, 2010, 17(4): 69-73.
- YAN Xia, ZHANG Kai, YAO Jun, et al. Review on automatic history matching methods for reservoir simulation[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(4): 69-73.
- [66] ZHENG S, HWANG J, MANCHANDA R, et al. An integrated model for non-isothermal multi-phase flow, geomechanics and fracture propagation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 196: 107716.
- [67] FRIGO M, ISOTTON G, JANNA C, et al. A GPU-accelerated simulator for challenging extreme-scale geomechanical models[R]. *SPE* 212198, 2023.
- [68] ISOTTON G, JANNA C, SPIEZIA N, et al. A GPU-accelerated linear solver for massively parallel underground simulations[R]. *SPE* 204011, 2021.
- [69] MANEA A M. A massively parallel restriction-smoothed basis multiscale solver on multicore and GPU architectures[R]. *SPE* 203939, 2021.
- [70] SIAVOSHI J, MUKUNDKRISHNAN K. A revolution in performance using a GPU based simulator[R]. *SPE* 200748, 2020.
- [71] HU J, GARAGASH D I. Plane-strain propagation of a fluid-driven crack in a permeable rock with fracture toughness[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2010, 136(9): 1152-1166.
- [72] GUILLAUME S, AMIR S, CHARONNAT S, et al. Use of numerical simulation enhanced by machine learning techniques to optimize chemical EOR application[R]. *SPE* 211400, 2022.
- [73] ABBASI J, ANDERSEN P Ø. Improved initialization of non-linear solvers in numerical simulation of flow in porous media with a deep learning approach[R]. *SPE* 209667, 2022.
- [74] PUTCHA V B, ERTEKIN T. A hybrid integrated compositional reservoir simulator coupling machine learning and hard computing protocols[R]. *SPE* 192368, 2018.
- [75] 刘合, 李艳春, 贾德利, 等. 人工智能在注水开发方案精细化调整中的应用现状及展望[J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1574-1586.
- LIU He, LI Yanchun, JIA Deli, et al. Application status and prospects of artificial intelligence in the refinement of waterflooding development program[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1574-1586.
- [76] 匡立春, 刘合, 任义丽, 等. 人工智能在石油勘探开发领域的应用现状与发展趋势[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(1): 1-11.
- KUANG Lichun, LIU He, REN Yili, et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 1-11.
- [77] 宋新民, 李勇. 中东碳酸盐岩油藏注水开发思路与对策[J]. *石油*

- 勘探与开发,2018,45(4):679-689.
- SONG Xinmin, LI Yong. Optimum development options and strategies for water injection development of carbonate reservoirs in the Middle East[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018,45(4):679-689.
- [78] 贾德利,刘合,张吉群,等. 大数据驱动下的老油田精细注水优化方法[J]. *石油勘探与开发*,2020,47(3):629-636.
- JIA Deli, LIU He, ZHANG Jiqun, et al. Data-driven optimization for fine water injection in a mature oil field[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020,47(3):629-636.
- [79] EVENSEN G. Data assimilation: the ensemble Kalman filter[M]. Berlin; Springer, 2009.
- [80] BAO Anqi, GILDIN E, HUANG Jianhua, et al. Data-driven end-to-end production prediction of oil reservoirs by EnKF-enhanced recurrent neural networks[R]. SPE 199005, 2020.
- [81] 刘亭亭,陈梦君,秦其峰,等. 人工智能模型与先进流程工业大数据降维双模型联合的智能优化技术[J]. *石化技术与应用*,2022,40(1):1-6.
- LIU Tingting, CHEN Mengjun, QIN Qifeng, et al. Smart optimization technology combined by dual-model of artificial intelligence model and advanced process industrial big data dimensionality reduction [J]. *Petrochemical Technology & Application*, 2022,40(1):1-6.
- [82] TARIQ Z, MAHMOUD M, ABDULRAHEEM A. An artificial intelligence approach to predict the water saturation in carbonate reservoir rocks[R]. SPE 195804, 2019.
- [83] SHAHKARAMI A, MOHAGHEGH S. 智能代理在油藏建模中的应用[J]. *石油勘探与开发*,2020,47(2):372-382.
- SHAHKARAMI A, MOHAGHEGH S. Applications of smart proxies for subsurface modeling[J]. *Petroleum Exploration and Development*,2020,47(2):372-382.
- [84] SENDEL A, TURKARSLAN G. Assisted history matching of a highly heterogeneous carbonate reservoir using hydraulic flow units and artificial neural networks[R]. SPE 200541, 2020.
- [85] 刘文岭,韩大匡. 数字孪生油气藏:智慧油气田建设的新方向[J]. *石油学报*,2022,43(10):1450-1461.
- LIU Wenling, HAN Dakuang. Digital twin system of oil and gas reservoirs; a new direction for smart oil and gas field construction [J]. *Acta Petrolei Sinica*,2022,43(10):1450-1461.
- [86] YAO Jianpeng, LIU Qingbin, LIU Wenling, et al. 3D reservoir geological modeling algorithm based on a deep feedforward neural network; a case study of the delta reservoir of Upper Urho Formation in the X area of Karamay, Xinjiang, China[J]. *Energies*, 2020,13(24):6699.
- [87] DUEY R. Closing the loop: a new workflow takes some of the guesswork out of reservoir modeling [EB/OL]. (2017-08-01) [2021-06-02]. <https://www.hartenergy.com/exclusives/closing-loop-176611>.
- [88] 杨剑锋,杜金虎,杨勇,等. 油气行业数字化转型研究与实践[J]. *石油学报*,2021,42(2):248-258.
- YANG Jianfeng, DU Jinhua, YANG Yong, et al. Research and practice on digital transformation of the oil and gas industry[J]. *Acta Petrolei Sinica*,2021,42(2):248-258.
- [89] 陈岳飞,肖珍芳,方向. 数字孪生技术及其在石油化工行业的应用[J]. *天然气化工(C1化学与化工)*,2021,46(2):25-30.
- CHEN Yuefei, XIAO Zhenfang, FANG Xiang. Digital twin technology and its application in petrochemical industry[J]. *Natural Gas Chemical Industry*,2021,46(2):25-30.

(收稿日期 2023-10-01 改回日期 2024-05-12 编辑 王培玺)