

复合化学驱体系优化与应用实践

胡凯捷

辽河石油勘探局有限公司石油化工技术服务分公司，辽宁盘锦，124000；

摘要：随着油气资源开发向精细化、绿色化方向发展，传统驱油技术在残余油捕获效率与储层渗透率提升方面的局限性逐渐凸显，并成为制约油气田开发效益提升的因素。复合化学驱技术基于分子工程学原理，创新打造多组分协同作用的智能驱油体系，其中，聚合物凭借其黏弹性，可以有效扩大流体在油藏中的波及范围，表面活性剂通过降低油水界面张力，能削弱原油的黏附力，而碱剂与纳米材料的配合，能对油藏微观孔隙结构进行重塑。

关键词：复合化学驱体系；优化；应用

DOI：10.69979/3041-0673.25.10.018

在全球能源结构加速转型与地缘政治博弈加剧的促进下，石油作为工业化与国家能源安全的屏障，其高效开发能保障能源体系稳定、增强化工产业国际竞争力。当前，能源需求的增长与剩余油藏非均质性强、开采难度大的矛盾突出，传统驱油技术在提升采收率、实现精细化开采方面遇到的技术问题，急需通过理论创新与技术优化进行突破。而复合化学驱体系融合多组分协同增效制度，通过聚合物的流度调控拓展波及范围、表面活性剂的界面张力优化降低驱油阻力、碱剂与纳米材料的作用建立储层微观结构，并创建具备自适应调控能力的智能驱油体系。

1 复合化学驱体系理论基础

1.1 复合化学驱技术

复合化学驱技术主要以分子工程学与流体力学为理论基础，通过创新设计多组分协同作用制度，建立智能化驱油体系。该技术颠覆传统单一化学剂驱油模式，将聚合物、表面活性剂、碱剂与纳米材料进行整合，形成功能互补的复合体系。其中，聚合物通过调节溶液黏弹性优化流度比，抑制流体窜流，扩大驱替波及范围，表面活性剂降低油水界面张力，会削弱原油与岩石的黏附力，让原油剥离。碱剂与原油中酸性物质发生皂化反应，能进一步降低界面张力并稳定乳化体系，而纳米材料则凭借其小尺寸效应与高比表面积，深入孔隙喉道，改变岩石润湿性，有助于增强原油流动性。另外，通过对各组分配比与动态参数优化，复合化学驱技术形成具备高波及效率与强驱油能力的智能流体，从而为复杂油藏剩余油的高效开发提供创新性的解决方案。

1.2 复合驱油机理

实际上，复合驱油机理是多组分协同作用下对油藏

渗流特性的多尺度调控过程。从宏观角度来看，聚合物增黏改变驱替液流变性，抑制指进现象，让驱替前缘均匀推进，以此来提升宏观波及效率。表面活性剂与碱剂协同降低界面张力，让原油从岩石表面剥落形成微小油滴，增强原油流动性。对于微观方面，纳米材料能进入微米级孔隙，改变岩石表面润湿性，降低原油残余饱和度。不仅如此，多组分协同效应形成的超低界面张力体系，有助于降低驱油阻力，进一步提升微观驱油效率。而这种宏观与微观的共同作用，能在一定程度上突破传统驱油技术的局限，实现对油藏残余油的有效启动与驱替，更能提高原油采收率，从而也为油藏高效开发开辟新的方向。

2 复合化学驱体系的优化方法

2.1 建立环境友好型体系

在全球碳中和战略快速推进的背景下，应建立环境友好型的复合化学驱体系，来促进石油工业的绿色转型。该体系围绕“减量化、无害化、资源化”目标，从材料创新与配方优化降低化学驱油的生态负荷。在材料方面，利用合成生物学与绿色化学技术，将天然多糖、蛋白质等可再生资源转化为可生物降解的聚合物驱油剂，彻底消除传统高分子材料的地层残留隐患。在配方设计中，通过分子结构逆向工程，开发低碱/无碱协同体系，并利用表面活性剂与纳米材料的协同增效替代碱剂功能，尽可能避免碱岩反应引发的黏土膨胀与孔隙堵塞，还要注重降低采出水处理的环境压力。另外，创新构建微生物-化学耦合驱油制度，将微生物代谢产生的生物表面活性剂与化学驱油剂进行功能互补，确保在提升原油流动性的基础上，实现化学药剂用量的下降，最终达成能源开采效率与生态环境保护的优化。

2.2 模块化配方设计

通过建立功能独立、接口统一、协同增效的技术框架,来提升技术的工程适配性与效率。该设计根据油藏地质大数据分析,将驱油体系分解为聚合物增黏、表面活性剂降阻、纳米材料改性等标准化功能模块。各模块通过分子动力学模拟与微流控实验进行参数预优化,聚合物模块通过调控分子链构象实现流量精准控制,表面活性剂模块根据原油组分特征进行亲水亲油平衡值动态匹配,纳米材料模块利用介孔结构实现孔隙表面能的靶向调节。根据标准化的数据交互协议,这些模块可以根据油藏渗透率变异系数、原油黏度-温度曲线等实时参数,通过算法模型快速生成定制化配方。而这种“即插即用”的积木式架构,不仅能实现从均质油藏到缝洞型油藏的全场景覆盖,更通过模块的独立升级与重组,进一步推动复合化学驱技术向智能化的方向转变。

2.3 多组分精准筛选与配比优化

多组分精准筛选与配比优化,能推动复合化学驱体系效率的提升,通过建立多元的协同优化结构,实现从理论建模到现场应用的贯通。面对油藏原油性质差异显著、岩石矿物组成复杂多变、孔隙结构非均质性强等挑战,该技术以油藏精细描述为基础,综合运用原油全组分分析、X射线衍射矿物定量表征、高压压汞孔隙结构测试等手段,建立包含储层物性参数、流体化学特性的数据库,创建化学剂与油藏条件的评价体系,为精准筛选奠定数据基础。

而在化学剂筛选环节,可以采用“虚拟仿真+实验验证”的双轮驱动模式。分子动力学模拟基于量子力学与统计力学原理,从原子层级分析化学剂分子与原油、岩石表面的相互作用制度,量化聚合物分子链构象变化、表面活性剂吸附动力学和纳米材料界面的修饰效应,为化学剂分子结构设计提供理论指引。微观驱油实验利用微流控芯片技术,建立可视化的多孔介质模型,动态监测化学剂在孔隙尺度的渗流特征与驱油效率,验证模拟结果的可靠性,系统确定聚合物分子量分布、表面活性剂亲水亲油平衡值(HLB)、碱剂类型、纳米材料表面改性方案。另外,在配比优化阶段,根据响应面法、遗传算法等智能优化工具,可以建立多组分协同作用预测模型。其中,响应面法通过实验设计与回归分析,能量化各组分间的协同增效与竞争拮抗关系,并建立响应曲面模型,遗传算法模拟生物进化中的自然选择与基因重组过程,在高维参数空间中进行全局寻优,结合参数敏感性分析,识别影响驱油效果的控制变量及其最优取值范围。

3 复合化学驱体系的应用

3.1 纳米材料复合增效技术

纳米材料复合增效技术以材料科学创新与分子作用制度创新为动力,结合纳米颗粒的量子尺寸效应与表面原子高活性特征,该技术实现对油藏微观孔隙结构的调控。纳米颗粒凭借纳米级粒径优势,能深入微米级孔隙喉道,通过表面电荷吸附与化学键合作用,定向改变岩石表面润湿性,将亲油表面转变为亲水表面,以此来削弱原油与孔隙壁面的黏附力,降低残余油饱和度。与此同时,纳米材料与表面活性剂形成协同增强网络,并在高盐、高温等极端环境下,通过空间位阻效应与静电排斥作用,提升表面活性剂的分散稳定性,让油水界面张力降到超低水平,驱动原油乳化为微小液滴,在一定程度上提升流动性。通过表面接枝、官能团修饰等改性手段,调控纳米材料与聚合物、碱剂等组分的协同作用,建立宏观波及与微观驱替结合的复合驱油体系。该体系不仅能扩大驱替液波及范围,更在孔隙尺度实现对剩余油的高效驱替,为致密油藏、裂缝性油藏等复杂地质条件下的难动用储量开发提供突破性的技术方案。

3.2 边际油田经济开发

边际油田受限于储量规模小、开发成本高、地质条件复杂等因素,传统开采技术很难实现经济效益。复合化学驱体系凭借其精准化设计与智能化调控的优势,能解锁边际油田开发潜力,该技术通过建立包含油藏地质参数、流体性质特征与开采成本的多目标优化模型,结合大数据挖掘与机器学习算法,对化学剂配方与注入参数进行挖掘,在确保驱油效率的基础上,实现化学剂用量的精准控制与成本优化。而模块化配方设计基于边际油田的复杂地质特性,通过标准化功能模块的灵活组合,快速定制适配不同渗透率、原油黏度条件的专属开发方案。环境友好型复合化学驱体系能进一步降低采出水处理成本与环境合规风险,配合智能监测系统对油藏动态的实时感知与注入参数的自适应调整,从而实现开发全周期效益的最大化。这种技术模式突破传统开发,能成功将大量边际储量转化为经济可采资源,有助于提升油气资源的综合利用率,更为全球油气工业开辟新的储量增长空间,进一步推动边际油田开发的高效、经济、可持续发展。

3.3 特高含水期油藏挖潜

特高含水期油藏开发目前已经进入资源挖潜深水区,传统驱油技术因油藏渗流场的演变陷入效能瓶颈。长期注水开发导致储层内部形成复杂优势渗流通道,剩余油呈现高度分散、非均质赋存状态,常规的技术手段

很难突破残余油有效启动的阈值。复合化学驱体系则以多组分协同作用为核心,通过建立宏观流场调控与微观孔隙改造的一体化解决方案,为老油田二次开发开辟新途径。该体系基于聚合物、表面活性剂、碱剂、纳米材料的功能互补特性,创建多元协同驱油制度。聚合物通过黏弹性调控优化驱替液流变性,抑制水窜现象,让驱替前缘均匀推进,实现波及体积的系统性拓展。表面活性剂与碱剂通过协同降低界面张力,在一定程度上削弱原油与岩石表面的黏附力,让残余油剥落形成可以流动的微小油滴。另外,纳米材料凭借其纳米级尺寸效应与表面活性,深入孔隙喉道重塑岩石润湿性,有助于进一步降低残余油饱和度。而这种多组分协同作用能实现从宏观波及效率提升到微观驱油能力强化的有效突破。在工程应用方面,根据分子动力学模拟与油藏数值仿真技术,建立化学剂组分-注入参数-油藏响应的多元化模型。通过实时采集油藏压力、含水率、化学剂浓度等相应数据,建立基于机器学习的智能化决策系统,以此来实现化学剂配方与注入时序的自适应优化。

3.4 高温高盐油藏

众所周知,高温高盐油藏凭借 80℃ 以上地层温度与 20 万 mg/L 级矿化度的极端环境,成为化学驱油技术应用的“技术洼地”。在严苛的条件下,传统化学驱油剂面临分子结构与功能失效的困境,高温引发聚合物主链断裂导致黏度骤降,高盐度让聚合物链构象蜷缩、表面活性剂发生盐析沉淀,导致界面张力调控能力丧失,最终造成驱油效率断崖式下降。而复合化学驱体系通过材料基因工程与分子智能设计的融合,为特殊油藏开发提供系统性的解决方案。对于材料的创新,复合化学驱体系采用协同优化策略的突破技术瓶颈,针对聚合物稳定性难题,通过融入刚性芳杂环构筑耐高温骨架,接枝两性离子侧链增强抗盐螯合作用,并建立动态、可逆交联网络实现分子链自修复,让聚合物在高温高盐环境下的黏度保留率提升超过 40%。表面活性剂研发则运用逆向分子工程,通过非离子-阴离子的梯度聚合技术,准确调控疏水-亲水链段比例,形成具有自适应调节能力的两亲分子结构,确保在高盐度下仍然能维持 10^{-3} mN/m 量级的超低界面张力。

纳米材料的介入则能进一步完善体系性能,其高导热特性可以有效缓解化学剂热降解,离子屏蔽效应降低盐离子对体系的干扰,表面电荷调控功能优化驱替液离子兼容性,以此来增强体系整体的抗盐性能。多组分协同作用建立的三维驱油制度,聚合物通过稳定黏弹性调

节流度比,实现波及范围的宏观拓展,表面活性剂降低界面张力,会削弱原油与岩石表面的黏附功,纳米材料深入孔隙喉道,通过表面能调控降低残余油饱和度。根据高温高盐油藏专属化学剂适配模型,融合分子动力学模拟与高温高压物理模拟实验,要建立数据驱动的多参数协同优化平台,实现化学剂配方与注入工艺的准确调控。现场应用表明,该技术可以让高温高盐油藏采收率提升 15%-20%,成功将“技术禁区”转化为储量增长极,从而为全球非常规油气资源开发开辟新的技术途径。

4 结束语

总而言之,复合化学驱体系的优化与工程实践,标志着石油开采技术正从经验驱动的传统模式向创新的智能绿色模式跨越。面对复杂油藏开发的技术壁垒,该体系以多组分协同制度创新和模块化智能设计为核心,通过分子工程调控、材料性能优化,实现对传统驱油技术的突破。在特高含水期油藏,其增效制度激活顽固残余油,在边际油田开发中,凭借精细化成本控制与动态参数优化,将边际储量转化为经济可采资源,在高温高盐等极端环境下,材料科学与分子工程的融合能确保体系稳定运行。而随着纳米技术、人工智能与绿色化学的融合,复合化学驱体系既能为全球油气资源的高效开发注入动力,更能重塑能源开发与生态保护的协同发展。

参考文献

- [1] 张家琦. 简析化学复合驱技术研究与应用现状及发展趋势[J]. 科学中国人, 2017, (3X): 29-30.
- [2] 计秉玉, 孟霖, 束青林, 等. 稠油化学复合冷采技术研究与应[用][J]. 中国工程科学, 2024, 26(01): 216-224. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.07.001.
- [3] 贾瑞轩, 刘卫东, 孙灵辉, 等. 复合离子聚合物调驱体系研究与应[用]进展[J]. 应用化工, 2020, 49(01): 240-243+247.
- [4] 李文亮. 基于生灭过程二维多组分复合驱模型构建与应[用][J]. 数学的实践与认识, 2022, 52(12): 127-133.
- [5] 李明. 改进化学工程与技术专业实践教学体系的影响与展望[J]. 化工教育, 2023, 40(2): 56-67.

作者简介: 胡凯捷(1991.11.04), 男, 汉族, 山东即墨, 大学本科, 中级工程师职称, 油田地面集输产品应用、油田化学助剂产品配方体系研发, 单位: 辽河石油勘探局有限公司石油化工技术服务分公司。