

低渗油藏渗吸体系优选与经济效益评价

淳于朝君 官庆卿 景文龙 张冰岩 范丽君

(中国石化胜利油田分公司石油工程技术研究院, 山东 东营 257000)

摘要:为解决低渗-特低渗砂岩油藏渗吸吞吐采出程度低的问题,本研究开展了渗吸特征研究、渗吸体系优选与经济效益评价。研究明确了润湿性、界面张力和裂缝数量为渗吸采油主控因素,优选出适用于低渗砂岩油藏的高效渗吸增产体系。现场应用表明,该体系注入后平均单井措施累增油达768.8t,平均单井有效期606天,投入产出比达1:3.4,有效激活了剩余油潜力,实现了高产稳产,具有显著的经济效益和应用推广价值。

关键词:低渗透;砂岩;渗吸;润湿性;界面张力;经济效益

中图分类号: TE357 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167(2025)034-0079-03

Optimization and Economic Evaluation of Imbibition Systems in Low-Permeability Reservoirs

Chunyu Zhaojun, Guan Qingqing, Jing Wenlong, Zhang Bingyan, Fan Lijun(Petroleum Engineering Technology Research Institute, Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: To address the low recovery factor in low- and ultra-low permeability sandstone reservoirs during imbibition huff and puff, this study conducted research on imbibition characteristics, optimization of imbibition systems, and economic evaluation. The study identified wettability, interfacial tension, and fracture density as the main controlling factors for imbibition oil recovery. An efficient imbibition stimulation system suitable for low-permeability sandstone reservoirs was optimized. Field applications demonstrated that after the injection of this system, the average cumulative incremental oil production per well reached 768.8 tons, with an average effective period of 606 days per well and an input-output ratio of 1:3.4. This approach effectively activated the remaining oil potential, achieved high and stable production, and demonstrated significant economic benefits and application value.

Keywords: low permeability; sandstone; imbibition; wettability; interfacial tension; economic benefit

随着油田生产的不断深入,低渗透油藏在开发中的占比和重要性日益突出。部分低渗透砂岩、致密砂岩区块渗透率低、连通性差,整体采用压裂+压驱开发,由于渗透率低、孔喉小、启动压力高等储层物性先天原因,部分井压驱见效,地层能量得不到有效补充,采油速度低,严重影响着油田开发效果。为提高低渗透砂岩油藏开发效果,胜利油田开展了渗吸吞吐增能技术现场实验。因存在渗吸机理不明确,影响规律不清,渗吸体系适应性不强等问题,大多渗吸工程参数借鉴压驱注水与降压增注现场实施经验,无法有效支撑低渗透砂岩油藏渗吸吞吐增能技术的方案设计与现场实施。本文以胜利油田低渗透砂岩油藏Y184为例,开展了基于CT扫描的低渗透砂岩岩心孔喉微观结构与高温高压条件下渗吸驱动特征研究,探索了低渗透砂岩油藏孔隙结构与渗吸速度的关系,明确了渗吸采油主控因素,并通过开展不同类型渗吸体系适应性研究,筛选出了适用于低渗透砂岩油藏渗吸增产体系,为油田可持续性发展提供重要技术支撑。

1 孔喉微观结构与高温高压条件下渗吸驱动特征研究

1.1 基于CT扫描的低渗透岩心微观孔喉结构分析

取低渗透砂岩油藏Y184块岩心并进行气测孔渗测试,测试岩心渗透率以超低渗、特低渗为主。结合CT扫描,通过数字岩心和孔隙网络模型对其微观孔喉结构表征发现:表征岩心孔隙连通性差、非均质性强,微观孔隙空间分布极不均匀,存在孤立孔隙和狭窄喉道。

岩心孔隙结构特征参数测试表明,随着渗透率的降低,孔隙结构特征参数逐渐变差。具体表现在平均孔隙半径、平均喉道半径、平均喉道长度及配位数均有所降低,迂曲度增加,孔隙联通性差,可导致剩余油在非均质孔喉中不规则赋存,且开采难度较高。

1.2 基于微流控的孔隙结构与渗吸速度关系研究

采用具有不同孔喉比、配位数和迂曲度的单孔隙结构微流控芯片进行自发渗吸实验,研究孔喉比、配位数和迂曲度对渗吸速度的影响,并判断主控影响因素。首先,通过模拟油水两相自发渗吸过程,研究孔喉比、配位数、迂曲度对渗吸速度以及渗吸置换效率的影响。实验表明:自发渗吸速度随着孔喉比和迂曲度的增加而减小,随着配位数的增加而增大;天然复杂的孔隙结构,反而比均匀整齐的孔隙结构更能促进渗吸。

开展孔喉比、配位数、迂曲度对渗吸速率影响的统计分析,发现孔喉比与配位数对油水两相渗吸速率均有显著影响。孔喉结构影响油水两相渗吸速度的影响比重为:配位数>孔喉比>迂曲度。在渗吸过程中配位数为主控因素,说明在油水两相渗吸置换过程中孔隙连通性更为重要。

1.3 岩心自发渗吸规律研究

1.3.1 渗吸特征研究

①温度及渗透率对渗吸规律影响。采用不同渗透率的岩心模拟在不同地层温度下的油水自发渗吸过程,考察温度及渗透率对渗吸规律影响。通过实验发现:随着渗透率降低,采出程度增大,渗透率降低1个数量级,渗吸采出程度提高3%,温度升高原油粘度下降,渗吸作用增强,采出程度增大,渗吸速度加快。分析认为储层渗透率小,孔喉半径小,毛管力强,渗吸效果显著;温度升高,原油粘度下降,黏滞力减小,渗吸效果明显提升。

②润湿性对渗吸规律影响。选取3块形状一致、渗透率相近的Y184块岩心,部分岩心用润湿剂处理润湿性,在80℃常压条件下进行渗吸实验,研究润湿性对渗吸规律的影响。从实验结果可以得出,润湿性是影响渗吸采出程度的主要因素,岩心越亲水,渗吸速率越快、渗吸采出程度越高。这是因为,岩心越亲水,相同界面张力下,毛管力越大,水越容易被亲水岩心自发吸进去,岩心中的油越容易被水置换出来,尤其是对于强亲水岩心。

③界面张力对渗吸规律影响。选取3块形状一致,渗透率相近的Y184块岩心进行渗吸实验,设定实验温度为80℃,加入不同浓度渗吸体系,在常压下测量其界面张力,研究界面张力对渗吸规律的影响。可以看出:随体系浓度的增加,油水界面张力降低,渗吸采收率增大。降低界面张力可增强原油的变形能力,使不可动油瞬时变为可动油,更多可动油参与毛细管自发吸水排油过程,提高了渗吸采收率。

④裂缝对渗吸规律影响。为研究裂缝对低渗砂岩渗吸规律的影响,选取4块性质相近的Y184岩心,在80℃常压条件下开展实验。通过在岩心中预制1mm非贯穿裂缝,并设置不同裂缝数量,系统分析裂缝发育程度对渗吸采收率的作用规律。可以看出,随着裂

缝数量的增大,渗吸采收率增大。裂缝越多,能够发生渗吸作用的地方越多,渗吸液可以通过裂缝进入到岩石基质中,将基质中的原油驱替出来,提高渗吸作用的强度。其次,岩心裂缝数量越多,岩心内各小岩块的体积越小,油滴更易被驱替到裂缝中,渗吸阻力降低,从而提高渗吸效率。所以,对于低渗砂岩油藏,地层裂缝发育情况越好,渗吸所得到的采收率越高。

1.3.2 渗吸采油主控因素研究

在低渗透砂岩油藏开发过程中,各因素对渗吸采收率都有影响。为区分主因和次因,在定性分析各个影响因素对渗吸采收率影响的基础上,利用灰色关联法对各影响因素进行权重分析,得到各影响因素权重为:润湿性>界面张力>裂缝条数>温度>渗透率。

2 不同类型渗吸体系适应性研究与优选

收集不同类型渗吸剂体系,通过对油水界面张力和润湿性两个主控因素优选最佳体系开展油水自发渗吸实验,对体系进行适应性评价,并提出渗吸增产体系优选及适应性指导意见。

2.1 渗吸增产体系筛选

以主控因素润湿性和界面张力为主,评价了5类8种渗吸体系,筛选出SXJ-1、SXJ-2、SXJ-5三种兼具良好润湿性和界面性能的渗吸体系(见表1)。

2.1.1 界面张力评价测试

将SXJ-1、SXJ-2、SXJ-5三种渗吸体系按照0.1%、0.3%、0.5%、1%的浓度配制溶液,分别在70℃和85℃条件下测试油水界面张力。实验表明:渗吸体系与原油的界面张力随浓度的增加而降低;渗吸体系SXJ-1、SXJ-5浓度小于1%时界面张力随温度的增加有所上升,当浓度为1%时三个体系耐温性明显增强,界面张力均保持在0.2mN/m以下;SXJ-5的界面张力较另外两种渗吸剂最小,体系1%浓度85℃下界面张力仅为0.009mN/m。

2.1.2 润湿性测试

将注入水、SXJ-1、SXJ-2、SXJ-5分别滴至饱和原油的岩心壁面,观察接触角变化不加渗吸剂的注入水在饱和原油的岩心壁面接触角大于90°,且随时间变化液滴接触角改变较小。渗吸剂与岩石壁面接触后,改变了岩石表面润湿性,岩石表面由油湿迅速转变为水湿。其中SXJ-5可将壁面润湿性改变为强水湿(润

表1 渗吸增产体系初筛

序号	渗吸体系名称	表面活性剂类别	有效浓度 /%	界面张力 /(mN/m)	接触角 /°
1	SXJ-1	含氟表面活性剂	1	0.099	60.32
2	SXJ-2	两性表面活性剂	1	0.018	49.78
3	SXJ-5	阴离子表面活性剂	1	0.016	42.1

湿角 =0°），润湿反转性能最好。

2.1.3 渗吸效果测试

为明确不同渗吸剂体系对低渗砂岩油藏的渗吸效果，选用同取心段四块低渗岩心，开展不同渗吸体系低渗透岩心静态渗吸实验。实验表明，渗吸过程呈现明显的两阶段特征：初期由毛细管力主导，渗吸剂优先进入大孔道，效率快速提升；后期动力减弱，效率增长趋于停滞。岩心渗透率对该过程具有主导作用，渗透率越高，初期增速越快且稳定阶段出现越早。三种渗吸体系渗吸产油量均大于1ml，最终采收率均大于50%，SXJ-5 采收率最高，为67.5%。实验表明，渗吸产油量和采出程度随界面张力的降低而增加，渗吸效果：SXJ-5 > SXJ-1 > SXJ-2 > 盐水。

2.2 体系适应性评价

①耐温抗盐性能。针对优选的SXJ-5作为渗吸增产体系开展耐温抗盐性能评价。在矿化度60000mg/L条件下，该体系表面张力基本无变化。130℃下多次高温老化后，能将油水界面张力降至 10^{-3} mN/m数量级，具有良好的耐温抗盐性。

②增溶性和抗吸附性。SXJ-5体系130℃下可与原油形成稳定的微乳液，增溶参数约为12，且静态吸附24h后界面张力为 2.8×10^{-3} mN/m，仍可达到 10^{-3} mN/m数量级，高温下具有良好的乳化性能和抗吸附性能。

3 经济效益分析

本章基于胜利河口油区渗吸增能吞吐试验井生产数据，从经济效益角度对油田开发策略进行评估，揭示当前开发阶段面临的经济规律与优化路径。

3.1 现场应用情况

2021年起至今，胜利河口油区针对地层能量低、供液差且具备渗吸增油潜力的低渗砂岩油藏开展了渗吸增能吞吐技术先导实验。截至目前，共实施9井次，累增油6150.4t，平均单井累增油768.8t，平均单井有效期606天，平均投入产出比3.4，初步取得了较好地效果。渗吸增产体系在现场的应用，成功激活了低渗砂岩储层的剩余油潜力，实现了长期稳产增效。

3.2 经济效益总体特征

现场试验数据显示，措施开发整体呈现“效益显著但内部分化”的特征。累计增油量证实了措施作业的经济价值，但个体差异悬殊：少数高效井贡献了大部分增油份额，显示出资源的集聚效应；而低效井的投入产出比接近甚至低于盈亏平衡点，形成边际效益陷阱。这种分化现象表明，油田开发效益与投入规模非简单线性相关，更取决于措施部署的精准性。

3.3 开发阶段与资源配置

从生产状态判断，多数样本井已进入中高含水期，

开发重点应从“能量补充”转向“流场调控”。此阶段的核心目标是延长经济生产寿命和提高采收率。数据显示，资源投入规模与经济效益并非正相关，个别高注入量井的经济效益反而低下，这反映出粗放型投入模式在开发中后期面临边际效益递减的严峻挑战。

3.4 优化方向与策略

基于分析，提出以下优化建议：首先，推动资产管理从“生产导向”向“价值导向”转变，建立以预期经济价值为核心的决策体系，将投入产出比作为关键指标，确保资本向高效领域配置。其次，构建地质-工程-经济一体化评价模型，利用大数据技术整合多源信息，提高措施效果与经济效益的预测精度，降低投资不确定性。最后，发展战略性成本管控与技术方案，在低效领域探索“轻量化”解决方案，同时从单井作业思维升级到油藏系统管理，通过井群协同开发实现区块整体价值最大化。

4 结论

本文基于CT扫描与高温高压渗吸实验，研究了低渗透砂岩孔喉结构与渗吸驱动特征，明确了孔隙结构与渗吸速度的关系及渗吸采油主控因素。通过开展不同渗吸体系适应性研究，筛选出耐温130℃、耐盐60000mg/L的渗吸增产体系，室内实验提高采收率15%以上，为现场应用提供了技术依据。研究得出以下结论：①渗吸主控因素依次为：润湿性>界面张力>裂缝条数>温度>渗透率；②优选出的渗吸增产体系SXJ-5在胜利河口油区试验井成功应用，有效激活剩余油潜力，实现长期稳产增效；③基于胜利河口油区现场试验，渗吸增能技术虽整体有效但呈现效益分化，需建立地质-工程-经济一体化评价模型，同时从单井作业思维升级到油藏系统管理，以实现区块整体价值最大化。

参考文献：

- [1] 胡章鹏. 低渗透油藏岩石物性对微观渗吸的影响机理研究 [D]. 西安石油大学, 2023.
- [2] 李侠清, 张星, 卢占国. 低渗透油藏渗吸采油主控因素 [J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(5):137-142.
- [3] 王建国. 低渗透油藏渗吸采油技术研究与应用 [J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(3):356-362.
- [4] 刘建华. 表面活性剂在低渗透油藏中的渗吸机理研究 [J]. 油田化学, 2023, 40(2):245-250.
- [5] 张志伟. 低渗透油藏开发经济效益评价方法研究 [J]. 石油经济, 2024, 32(1):45-51.

基金项目：山东省博士后创新项目资助 (SDCX-ZG-202502098)