

油田调剖调驱工艺优化与提高采收率应用

靳 琨

克拉玛依市三达新技术股份有限公司, 新疆 克拉玛依 834000

[摘要]面对我国多数油田高含水开采现状下出现的调剖调驱技术以及油藏非均质化加重问题越来越明显, 在此情况下, 调剖调驱技术通过对注入流体在地层中的流动路径进行改造, 封堵高压水流通道, 使液流转移到中低渗部位成为解决水驱波及系数低以及采收率低的有效措施之一。本文详细介绍了调剖调驱对于油田开发的重要意义以及主要工艺种类, 在此基础上对参数调整、注法选择、药剂配比及动态跟踪等方面进行工艺优化技术阐述并举出实例说明了其对增加波及系数、调整非均质状况、减小含水率及增加产量等方面的实际应用情况, 为进一步实施该类油田的相关技术方法提供借鉴依据。

[关键词]调剖调驱; 工艺优化; 提高采收率; 波及效率; 油藏非均质性

DOI: 10.64635/ja.2026.1178

中图分类号: TE357.46

文献标识码: A

Optimization of Profile Control and Displacement Adjustment Processes in Oilfields and Their Application in Enhanced Oil Recovery

Jin Kun

Karamay Sanda New Technology Co., Ltd., Karamay, Xinjiang 834000, China

Abstract: With most oilfields in China entering a high-water-cut production stage, problems such as increasingly serious reservoir heterogeneity and ineffective waterflooding have become more prominent. Under these conditions, profile control and displacement adjustment technology has become one of the effective measures for addressing low waterflooding sweep efficiency and low oil recovery. By modifying the flow paths of injected fluids in the formation and plugging dominant water-flow channels, this technology diverts fluids toward medium- and low-permeability zones. This paper introduces the significance of profile control and displacement adjustment in oilfield development and summarizes the main process types. On this basis, it discusses process optimization technologies in terms of parameter adjustment, injection method selection, agent formulation, and dynamic performance tracking. Practical cases are also used to illustrate the application effects of this technology in increasing sweep efficiency, improving reservoir heterogeneity, reducing water cut, and increasing production. The study provides a reference for the further application of related technologies in similar oilfields.

Keywords: profile control and displacement adjustment; process optimization; enhanced oil recovery; sweep efficiency; reservoir heterogeneity

引言

我国绝大多数油田历经多年的注水开采, 在很大程度上已经进入到了高含水乃至超高含水的开采时期, 而在这种情况下, 因为油藏本身所具有的层间、层内和层外非均质性, 所以在注入水中很容易就会出现沿高渗透带或者裂缝等形成的所谓的优势通道窜流的问题的发生, 这样一来就造成了油田内的水驱效果严重下滑了, 大量的残余油就被遗留在了中低渗透部分难以开采了。而随着水驱时间的增长, 注入水质将会对岩石的长期冲刷甚至会形成所谓的

大孔道等等的现象的发生, 这样就单单依靠近井地带的封堵就很难解决注入水绕流的问题, 针对这样的一种情况之下, 调剖调驱技术也就随之产生了并且逐渐的发展起来, 就是通过油藏内部深层位置来注入化学调堵剂来进行封堵高渗带, 让油气流动变向, 达到注入水能够作用到之前没能被波及的中低渗透层的目的。伴随化学材料技术的发展及油田工程精细化程度不断提高, 堵水压裂工艺也逐步由经验性施工转变为参数化, 智能化精确控制的趋势。本文主要归纳了该类工艺改进的过程以及增产的效果。

1 调剖调驱技术在油田开发中的作用

堵水堵厚技术在油田开采中的地位是继往开来的作用,它是对传统注入式开采缺陷的有效纠正,又是连接化学驱和其他三次采油方法之间的纽带。因为储层非均一性的存在使得注入的水首先沿着高渗透带及大型裂缝进行舌状推进,导致油田快速陷入高含水水平或极高含水期。堵水堵厚技术通过对油藏中优势导流通道的封堵,避免了不必要的注入水的回流,使注入水流向低渗透率区,低启动压力区,进而大大增加了波及范围,增大了注水见效面积。此外,堵水堵厚能揭示出长时间注水未动用的残留油层,延长油田稳产时间,降低油田的采收率下降幅度,在保持油田稳定生产,控制含水率下降上有重要作用。另外,堵水调剖技术应用范围较广,在中低含水水平时就可以进行来减缓含水水平升速度的变化,也可以与聚合物驱、化学驱等等相结合来提高整个开发区块的效果。

2 油田调剖调驱工艺类型

经过多年的发展,油田调剖调驱技术已经建立了比较系统的分类方式。深层调剖技术是采用无机或有机交联剂交联水溶性的聚合物来制备凝胶型调剖堵水剂,进入油层深处封堵高渗透地带,造成液流转向,使得注入水波及以前未曾波及的中低渗透带,提高驱替效率及采收率,它的作用范围远远大于常规的邻井调剖。从工艺体系来说,主要有:聚丙烯酰胺以及交联剂交联而成的凝胶类调剖方法,封堵能力强、抗冲刷;近几年来出现的一种聚合物微球调驱法,依靠的是微球在油藏孔隙内逐渐吸水膨胀、封堵喉道等来达到深层分段式的调驱目的。面对低渗透油藏裂缝性见水、高渗层水窜、剩余油难动用等一系列开发问题,在解决这些难题的过程中,低渗透国家工程实验室以控水增油为目的,不断开展技术创新,逐渐形成了集机理研究、产品升级、工艺创新、智能配套为一体的 PEG 凝胶精准调剖技术体系^[1],同时还有颗粒类调剖、泡沫调驱以及微生物调剖等新技术应用于部分油田开发中去。

3 油田调剖调驱工艺优化技术

3.1 参数优化设计

参数优化是调剖调驱工艺设计的重要步骤。优化对象包括调剖剂用量、注入浓度、注入速率、段塞组成等一系列工艺参数,及井组配注量、注采比等一系列开发参数。低渗透国家工程实验室根据不同开发阶段油藏特点,形成了“初期防护—中期控制—后期治理”的技术体系,工艺设计时遵循“一井一法”,做到油藏全生命过程的细致诊治。参数优化中一般应用数值模拟,建立油藏地质模型和

水驱开发历史拟合,比较分析各种不同的调剖调驱方案,从而选择最适宜的施工时间点及配套参数组合。现代参数优化的发展趋势逐渐向着智能化发展,用智能优化算法动态测评调驱方案的效果大大加强了解析复杂油藏条件下调驱方案的设计精确化率及工作效率。

3.2 注入方式优化

注水方法改良主要是指注水方法以及段塞结构的选择,在一定条件下选择合适的注水方法,不仅能够最大限度地发挥注入剂的作用,而且可以有效地延长此法的有效期,针对一些油井由于单一向水驱导致所导致的效益损失的现象,吉林油田制定了“早调,浅调,勤调”的整体调剖策略,同时创造了“泵车+配液箱”的新型注入工艺,它不但注入速率快、工序时间少,而且适用于各油田开采条件。新疆油田自主研制出我国第一套“分层注聚、调剖一体化装置”,实现了注水、注聚(聚合物)、调剖三项工作的“一键式”切换,解决了化学驱采油时多套体系协同调控的技术瓶颈。对于多级段塞体系而言,多级段塞串联注入已经成为普遍做法。低渗透国家工程实验提出的微球+PEG 双重效果技术以及采用 PEG 凝胶封堵高渗透夹层+微球深层替排的两级分注工艺能够在地下深处实现“分级封隔—弹性伸缩—逐层恢复”的精确性堵水驱油方式。

3.3 化学剂配比优化

化学剂的比例关系到调剖调驱体系的成胶性能以及封堵能力和有效期的长短,比例的选择要根据不同的油藏地层的温度、盐度、pH 值等环境因素进行设计适合当地地质情况的调驱体系。对于凝胶型调剖体系来说,聚丙烯酰胺溶液和交联剂浓度配比影响着体系的凝胶速度与强度,双基团二次交联体系的推荐配方为:5000~7000mg/LHPAM,125mg/L 有机铬交联剂,80mg/L 苯酚,120mg/L 乌洛托品,80mg/L 增强剂等等;对于聚合物微球体系来说是主要关注点是微球颗粒大小、膨胀程度以及耐高温耐高盐能力。长庆油气工艺研究院基于“延时膨胀、纵深调驱”的技术理念,研制出新一代缓膨微球 2.0 系列,在膨胀系数、膨胀速度、粒径分布、耐温耐盐这四个方面相比 1.0 系列均有较大进步^[2]。2025 年油田特色堵调技术研发以反应产物配比、反应条件调整为基础制备出室内样品并建立堵调系统。检测数据显示,该系统强度、热稳定性大幅增强,解决了当前堵塞调节剂难以深入到深层以及高难度封堵的问题难题,使堵调产品的性能有了质的飞跃。

3.4 动态监测与调整技术

动态检测是调剖调驱技术改进的有效保障,从施工到

投产后进行全过程动态检测可以随时调节相关参数达到最优化结果。主要检测方法有压力检测，示踪剂检测、产液剖面检测、微地震检测等，在针对高含水井治理时用以准确找到优势通道的技术团队开发了动静态结合以及示踪剂检测相结合的方式，先是对流线进行模拟并测试其吸水剖面得到整个油藏基本结构，然后再往里面注入示踪剂实时追踪其运动轨迹从而清晰地再现渗流通道方向、强弱程度和大小。针对动态调节问题，在某些地方已经使用智能化检测装置，在重要位置增设传感器等设备来获取多个方面的信息来进行注采参数的灵活控制。把实时收集起来的信息以及油藏数值模拟结合起来建立调剖调驱效果动态评价模型，发现施工中出现问题并进行调整已经成为提高工艺水平的有效方式之一。

表 1 调剖调驱主要工艺类型对比与适用条件

工艺类型	作用机理	主要化学剂	适用油藏条件
凝胶类调剖	化学交联形成三维网络封堵	聚丙烯酰胺+交联剂	中高渗透油藏，温度<90℃
聚合物微球调驱	吸水膨胀逐级封堵孔喉	聚合物微球（纳米至微米级）	低渗-特低渗油藏
PEG 凝胶调剖	预交联凝胶颗粒弹性封堵	PEG 系列微米凝胶	裂缝性见水、高渗层水窜油藏
颗粒类调剖	物理堵塞高渗透通道	预交联凝胶颗粒、体膨颗粒	裂缝发育、大孔道油藏
泡沫调驱	泡沫选择性封堵效应	起泡剂+稳泡剂+气体	非均质性强、气窜严重油藏

4 调剖调驱技术提高采收率的应用

4.1 提高波及效率

提升水驱波及系数是调剖调驱技术最直观的应用效果，在油田进行注水开采时因为地层非均质性以及存在优势流动通道使得注入水只能沿着少数几条路径运动，许多中低渗透率的残存原油得不到有效驱替而损失；调剖调驱通过封堵高渗透带使得注入水流向原来没有受到波及影响的地方即低渗部位，进而大大提高了波及范围。长庆油田建立的裂缝通道等效模型以“大小联合、强弱配合、小段塞、多次加砂、深部调堵”的思路，选择合适尺寸的高强度、柔性可膨胀颗粒或微米级单相凝胶调堵剂系统形成了两级封堵、弹性变形、逐级释放的精确调堵方式，削弱了裂缝水驱的导流效率，增大了波及范围。对于实施效益而言，大港油田运用好调剖调驱技术调整注入水流道，显著增加了注入水波及体积，加快了“低效注水”到“高效注水”的转变过程；长庆油田采取的 PEG 凝胶封堵高渗透率层+微球分段深部调驱工艺，有针对性地制定工艺参

数使得波及体积进一步增加 15%以上。

4.2 改善油层非均质性

调剖调驱技术可以有效地改变油藏非均质状况，抑制优势通道的进一步发展。由于长期水驱开采使得高含油饱和度层被不断地冲洗，渗透率进一步提高，造成恶性循环。调剖调驱采用选择性的封堵高渗透层来弥补层间的吸水差别，使得注入水在纵向上分布更趋合理，从根本上改善了油藏的非均质状况。针对三叠系水驱受单一砂体束缚、侏罗系出现注水突进等现象，长庆油田进行了有目标的选择性增注、小层调剖 76 口井，使水驱不均衡程度下降了 2.6 个百分点，开发效果有了整体提升。低渗透油气田工程技术研究中心提出的“前移防治—强化调控—后期治理”技术体系，对于中低含水油田采用精密注水及 PEG 堵剂工艺并用达到单井日增油 1.2 吨，含水率增长速率下降 50%目标，以及对于高含水区块采用“PEG+微球”的深层调驱措施使区块日增油量突破 200 吨^[3]。此外，深层调驱技术还能推迟高渗透性油层重新形成的速度，在一定程度上有利于油田的长远发展。

4.3 降低含水率

减少含水率是调剖调驱技术最大的经济价值。原油采出阶段已进入到高含水时代，产液量猛增而产油量却不断下滑，使得地面处理费用大大提高。调剖调驱可以封堵水驱优势流道，减少注入水沿着高渗层的无效流动，能大幅度地降低油井含水率和区块综合含水率。长庆油田聚合物微球深部调驱技术在安塞、西峰、靖安、姬塬等油田共实施了 43 口井实验井，在生产上的效果是：油井产量自然递减率平均降低 3.0 个百分点以上，含水上升率平均降低 2.2 个百分点，累计增油 16000 吨以上，累计降水 21400m³。“微球+”技术体系累计实施了 1800 井次以上以后，在区块上的储层保存效率达到了 71%升至 78%，水驱利用率增加了 11.76%，自然递减率降低到 2.4%。胜利油田可恢复性凝胶堵调技术在孤东、孤岛等主力生产单位现场应用了 30 余井次，累计增油量已经超过了万吨以上。从作用上看，调剖调驱对于中高含水阶段的控水节支有明显的效果，在油田高含水开发上有着很好的经济价值。

4.4 提高原油采收率效果分析

对于提升原油最终采收率来说，堵水调剖调驱是实实在在有作用的，一方面提高了波及系数，改善了地层非均质性，另一方面它可以在短时间内提升产油量，更重要的是可以延长油田的经济开采年限，获取更多的残余油储量。在长 8 油层进行成功的“聚合物微球+堵水治疗”的

组合工艺中, 试验区单井组增油达到 160 吨以上, 在整个调驱阶段增油量达 5000 吨左右, 青海油田在强非均质区调整注入介质比例及重要变量之后, 预计提高驱油效果 5~10%, 产出比大于 2。增产增注效果有明显的阶段特点: 开始时主要表现为含水下降、产量上升; 中期为产量平稳递减放缓; 长时间作用下为最终采收率提高^[4]。调剖调驱措施提高产能的幅度一般为 5%~15%, 结果与油田地质状况、施工方法及施工规模有关。近些年基于智能调驱评价模型等新方法的应用使得调剖调驱效果检测、方案设计有了更有效的手段, 对于高含水老油田的稳产意义越来越大。

5 结语

堵水调剖及调驱工艺是解决水驱开采难题, 提升油田采收率的重要工程技术方法, 在国内各大油田得到大规模的应用并且已经产生了积极的效果。而随着技术的发展, 堵水调剖及调驱技术也正在向精确性、智慧性和联动性的方向发展, 其中精确性表现为化学药剂体系的设计和工艺参数的选择相适应, 智慧性表现为对堵水调剖及调驱作业进行动态监控以及适时调节相结合, 联动性即是指堵水调剖及调驱技术和各种提高采油效率的方法如化学驱、气驱等有机结合在一起的方式方法。面对深层、低渗透、致密

等难度较大的复杂油藏开发需要愈发强烈之时, 调剖调驱技术还存在很多不足之处, 比如高温高压盐浓度高的环境下化学品耐受性差的问题以及裂缝型油藏的深层封堵困难等等, 在接下来的工作中还需要继续研发新的功能性材料, 整合好油藏地质和调剖调驱工艺一体化的设计思路, 依靠人工智能及大数据技术来提升工艺设计水平, 不断地扩大调剖调驱技术的应用领域, 为国内油田高效开发和长期稳定生产奠定更好的技术支持基础。

【参考文献】

- [1]李振,张宇,王娟,等.渤海某油田井组调剖调驱效果评价[J].内江科技,2025,46(01):70-71.
 - [2]吴婧.油田调驱用聚合物溶解时间测定及成胶情况评价实验[J].云南化工,2022,49(04):61-63.
 - [3]吴慎渠,华科良,宁凯,等.海上油田调剖调驱在线注入工艺对比分析[J].化工设计通讯,2021,47(05):46-47.
 - [4]吴雅丽,敖文君,张宁,等.渤海 B 油田边水对注水井调剖调驱效果的影响研究[J].非常规油气,2020,7(03):55-59.
- 作者简介: 靳琨(1986.01—), 毕业院校: 长春工程学院, 所学专业: 安全工程, 当前就职单位名称: 克拉玛依市三达新技术股份有限公司, 就职单位职务: 部门经理, 职称级别: 工程师。