

胜利油田稠油降粘冷采技术进展及效益分析

佟 彤（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：针对目前稠油热采成本高，经济效益逐轮次降低、能耗及环保压力大，开发效果差的问题，攻关形成了稠油化学降粘开采技术。技术以降粘为核心，针对性地研发了降粘体系，完善了配套工艺，针对不同油藏特征和开发矛盾，发展了以降粘吞吐和降粘复合驱两大类系列降粘开采技术，矿场应用成效显著，开展了经济效益评价，与热采开发相比，取得了良好的经济效益以及社会效益。

关键词：稠油；降粘冷采；矿场应用；增油量；效益分析

我国稠油探明地质储量 43.5 亿吨，年产量约 1600 万吨，是世界第四大稠油生产国，目前主要以水驱和注蒸汽热采开发为主。水驱稠油由于油水流量比大，开发效果普遍较差，胜利水驱稠油的采收率只有 17.6%。热采稠油多轮次蒸汽吞吐后，受到水侵、汽窜和极限吞吐半径的影响，周期产油和油气比越来越低，呈现出了低产油量（单井产油 1.9t/d）、低采收率（20.7%）、高含水（89.5%）的“两低一高”的开发特征，严重影响了胜利油田稠油产量的稳定；同时受到注汽成本、能耗及环保压力的影响，热采成本成倍升高，效益越来越差。蒸汽驱（热化学驱）的采收率可以达到 35~50%，是蒸汽吞吐的有效接替技术之一，也是有效动用井间剩余油、提高采收率的主要手段，但是胜利稠油油藏埋藏多具有边底水，压力高（ $> 7\text{MPa}$ ），形成蒸汽腔困难，平均油气比低（ < 0.18 ），难以大规模推广。因此亟需转换开发思路，探索有效动用井间剩余油技术。

低成本、低排放冷采技术是国内外稠油开发技术研究的主要方向，化学降粘、掺稀油降粘、以及微生物降粘等方法多有研究和实践，但尚未形成主流技术。近几年，通过理论和技术攻关，研发了适用稠油油藏的关键化学剂，并通过室内优化研究，逐步形成了以降粘吞吐和降粘复合驱为核心的两大类系列化学降粘开采技术，开展了经济效益分析以及评价，为胜利稠油低效单元矿场的效益开发提供了技术支撑。

1 关键化学体系的研发进展

稠油化学降粘复合驱技术是稠油开发一项变革性技术，该技术通过在油藏条件下降低原油粘度，实现稠油的有效流动。根据胜利油田稠油油藏的特点，结合稠油致粘机理新认识，研发形成了一系列高效降粘驱油体系。其中降粘驱油体系 A 属于聚合物型表面活性剂，一方面其水溶液具有一定粘度，可有效控制窜

流；另一方面可解聚乳化稠油，实现稠油降粘，最终达到调剖和降粘协同提高采收率的效果。

2 稠油降粘吞吐技术进展及效益分析

稠油降粘吞吐是指利用高效降粘体系，大幅降低原油粘度，同时辅助气体补充地层能量，达到提高单井产能的目的。针对不同的油藏特征和开发矛盾，创新发展了系列化学降粘吞吐工艺模式。

与传统热采吞吐相比较，以增油量为主要衡量标准，按照油田的平均开发吨油成本，计算了每类工艺的开发效益，对稠油降粘吞吐这一绿色、低碳、经济的工艺技术有了更加全面的认识。

2.1 单一降粘吞吐

针对原油粘度大、能量足的稠油油藏，核心的技术思路就是降粘，通过降粘体系的注入，可以有效降低原油粘度和界面张力，从而实现降低启动压力梯度，扩大泄油半径，提高单井产能。

单一降粘吞吐技术实施效果表明：该技术的整体见效特征为液量上升、油量上升，含水略降。结合矿场分析、室内实验及数值模拟，初步形成了该技术的技术界限（见表 1）。

表 1 单一降粘吞吐推荐技术界限

原油粘度	$\leq 3000\text{mpa}\cdot\text{s}$ （油藏条件下）
渗透率	$\geq 500\text{md}$
采出程度	$\leq 15\%$
剩余含油饱和度	$\geq 45\%$
综合含水	$\leq 95\%$
离底水距离	$\geq 3\text{m}$
水油体积比	≤ 5
采液强度	$2.6\text{m}^3/\text{m}-5\text{m}^3/\text{m}$

该技术近三年在多轮次吞吐后、边底水等稠油油藏共实施 447 井次，近三年在稠油油藏应用累计增油 22.8 万吨，单井增油 511 吨；根据 2021 至 2023 年

油价以及平均成本（2021 全年平均油价 2967 元，平均成本 1240 元；2022 全年平均油价 4326 元，平均成本 1239.14 元；2023 全年平均油价 3851 元，平均成本 1253.98 元），计算出该类工艺近三年创效约为 5.63×10^4 万元，单井创效约 126.2 万元。

2.2 降粘 +CO₂ 复合吞吐

对于低渗敏感、封闭断块的“三低”（低能量、低含水、低采出程度）油藏，提出了“降粘 +CO₂”复合吞吐技术。其作用机理主要是：油溶性降粘剂降低稠油体系的粘度，并且可以增加二氧化碳等非凝析气体在稠油中的溶解量，降粘率可达 98.52%；另一方面二氧化碳利用其良好的传质作用，可以大幅度提高降粘剂的波及范围，同时给地层提供很好弹性能。

实施效果表明：该技术的整体见效特征为液量上升、油量上升，含水基本稳定。结合矿场分析、室内实验及数值模拟，初步形成了该技术的技术界限（见表 2）。

表 2 降粘 +CO₂ 复合吞吐推荐技术界限

原油粘度	≤ 5000mpa.s（油藏条件下）
渗透率	≥ 200md
采出程度	≤ 20%
剩余含油饱和度	≥ 40%
综合含水	≤ 95%
日液水平	≤ 20m ³ /d

降粘 +CO₂ 吞吐技术近三年在低渗敏感、小断块等稠油油藏共实施 205 井次，累计增油 9.14 万吨，单井增油 446 吨；根据 2021 至 2023 年油价以及平均成本，计算出该类工艺近三年创效约为 2.26×10^4 万元，单井创效约 110.2 万元。

2.3 降粘控水一体化

针对底水锥进、高含水的稠油油藏，研发应用了降粘控水一体化技术，该技术原理是氮气进入地层时，趋向进入油层顶部，可以压制水锥，实现地层中油水界面重新分布；二氧化碳及降粘剂能够与原油充分接触，协同降粘，有效降低油水流量比；氮气具有良好的可压缩性和膨胀性，在生产时能加速驱动地层中的原油返排，起到增能助排的效果，有效缓解稠油油藏开发过程中底水锥进引起的产量低、含水率高问题。

实施效果表明：该技术的整体见效特征为液量下降、油量上升、含水大幅下降。结合矿场分析、室内实验及数值模拟，初步形成了该技术的技术界限（见表 3）。

表 3 降粘控水一体化推荐技术界限

井型	水平井
原油粘度	≤ 2000mpa.s（油藏条件下）
采出程度	≤ 15%
剩余含油饱和度	≥ 40%
综合含水	≤ 95%
水油体积比	≤ 12

降粘控水一体化技术近三年在边底水稠油油藏共实施 180 井次，累计增油 6.16 万吨，单井增油 342 吨；根据 2021 至 2023 年油价以及平均成本，计算出该类工艺近三年创效约为 1.52×10^4 万元，单井创效约 84.5 万元。

2023 年为了进一步强化降粘控水一体化技术的应用效果、拓展应用范围，通过室内研究和矿场试验，改进了该项技术（凝胶等堵剂 +CO₂ + 降粘剂），提高了堵水强度，并在孤岛垦 71 单元共实施 29 井次，累计增油 16441t，累计创效 4269.8 万元。

3 降粘复合驱技术进展及经济评价

降粘复合驱指在地表条件下向注入水溶液中添加降粘剂，降低原油黏度、提高原油流动性，辅以堵调体系提高波及效率，生产井配合吞吐引效等工艺，增加油井产量，是一项低成本、低排放的提高采收率技术。胜利油田自 2018 年开始降粘复合驱矿场试验，目前在多轮次吞吐、薄互层等多种稠油油藏取得了突破，经济效益显著。

孤岛油田中二北 Ng5 位于孤岛稠油环北部，50℃地面脱气原油的黏度为 5921mPa·s，地下黏度为 400~600mPa·s，为高孔高渗、具边底水的构造 - 岩性普通稠油油藏，存在汽窜通道发育，多轮次开发效果变差，蒸汽驱扩大实施范围受限等开发难题。

2021 年 10 月，4 个试验井组开始正式注入，2023 年已扩大至 8 个井组，累计注入药剂 0.13PV，井组日油从 54.7t 上升至 79.4t，日增油 24.7t，含水从 90.9% 下降至 87%，截止 2023 年 12 月已累增油 2.88 万吨，根据 2021 至 2023 年油价以及该区块平均成本，计算出该类工艺近三年创效约为 7114.6 万元。

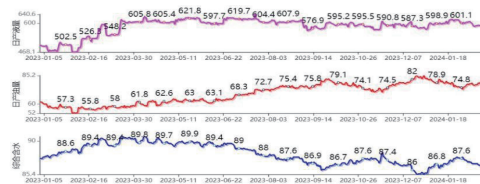


图 1 中二北 Ng5 降粘复合驱井组日度生产曲线

陈家庄油田陈 373 块属于薄层特稠油油藏, 含油面积 0.42km^2 , 地质储量 $27.6 \times 10^4\text{t}$, 2013 年投产, 采用水平井蒸汽吞吐开发; 储层厚度平均 4.8m, 地面原油黏度 11835mpa.s, 孔隙度 32%, 渗透率 2000md。多轮次蒸汽吞吐后, 周期效果变差 (油汽比递减率 21%), 产量递减快 (周期递减率 17%), 采收率低 (18%), 可采储量采出程度高 (70%), 亟需进一步提高采收率技术。示范区储层较薄, 热损失较大 (>65%), 目前地层压力高于 7MPa, 不适合转蒸汽驱。

根据陈 373 区块 4 口老井阶段累产油 17766 吨, 蒸汽吞吐预测累产油 11160 吨, 阶段累产油 6606 吨, 考虑化学复合驱产出滞后、投资回收期长, 增量成本构成复杂等特点, 建立了考虑实施效果、项目价值、回收风险、整体贡献等不同层次的评价指标; 针对稠油化学复合驱项目的特点, 应用现金流量法、有无对比法, 建立了相应的经济评价方法及评价模型。

基于有无化学复合驱项目产量预测剖面, 评价开采 10 年经济指标 (图 2): 吨剂增油 7.8t, 财务净现值 758 万元, 内部收益率 21%, 平衡油井 30 美元/桶, 操作成本降低 527 元/吨。



图 2 增量现金流预测图

4 稠油降粘开采技术矿场应用及效益总览

为了探索这项变革性的节能环保提高采收率技术可行性, 胜利油田根据稠油油藏降粘开采的筛选标准, 从技术成熟度、油藏地质条件及开发状况等角度综合考虑, 分层次、分步骤实施。

2018 年以来稠油化学降粘吞吐技术应用规模和增油量持续增加, 截止到 2023 年底共计实施 1709 井次, 增油 56.5 万吨, 根据油田当年油价以及平均开发成本, 计算该类工艺累计创效约为 13.96×10^4 万元。

降黏复合驱规模逐步扩大, 截至 2023 年底, 已在 24 个开发单元 90 个井组开展应用, 覆盖地质储量 3215 万吨, 增油量由 2018 年的 0.18 万吨攀升至 9.8 万吨, 根据油田当年油价以及平均开发成本, 计算该类工艺 2023 年当年创效约为 2.42×10^4 万元。取得了良好的经济效益和社会效益。

表 4 降粘驱替单元实施效果表

时间	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	合计
增油量/ 万吨	0.17	0.92	3.4	3.9	4.6	9.8	22.79

5 结语

本文介绍了胜利油田稠油降粘冷采技术的研究进展, 主要介绍了稠油降粘吞吐技术和降粘复合驱两种技术, 对于稠油绿色高效开发具有参考意义。

全文对两大类技术进行了分类, 针对每一亚类的技术进行了介绍, 给出了相应的技术界限, 完成了矿场应用, 对每一亚类的应用效果进行了跟踪、统计以及分析, 计算了经济效益, 以陈 373 降粘复合驱块为例, 开展了经济效益评价。矿场试验表明, 稠油降粘冷采技术的应用明显提升了稠油产量和采收率, 效益显著, 为胜利油田 3.5 亿吨具备冷采开发潜力的稠油油藏提供了技术支撑, 推广应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 张蔓, 张军, 叶锋, 黄海兵. 稠油蒸汽吞吐油汽比经济界限预测模型 [J]. 特种油气藏, 2020, 17(06): 31-34.
- [2] 皮之洋, 金蕾, 李得轩等. 稠油降粘开采技术及研究进展 [J]. 山东化工, 2020, 49(8): 96-101.
- [3] 汪卫东. 微生物采油技术研究及试验 [J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(1): 107-113.
- [4] 陈静. 普通稠油化学法驱油体系优化设计研究 [D]. 北京: 中国石油大学 (北京), 2017.
- [5] 柳荣伟, 陈侠玲, 周宁. 稠油降粘技术及降粘机理研究进展 [J]. 精细石油化工进展, 2008, 9(4): 20-25.
- [6] 王静. 稠油开采新途径——“自生 CO_2 与化学降粘复合吞吐技术” [J]. 中外科技情报, 2006(16): 2-2.
- [7] 常运兴, 张新军. 稠油油溶性降粘剂降粘机理研究 [J]. 油气田地面工程, 2006, 25(4): 8-9.
- [8] 杨森, 许关利, 刘平等. 稠油化学降粘复合驱提高采收率实验研究 [J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(5): 80-86.
- [9] 张云宝, 卢祥国, 王婷婷等. 渤海油藏优势通道多级封堵与调驱技术 [J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(3): 82-88.
- [10] 杨勇, 王建, 卜亚辉等. 胜利油田压驱开发技术实践与认识 [J]. 油气地质与采收率, 2023(3): 87-93.

作者简介:

佟彤 (1990-), 女, 辽宁沈阳人, 学士, 工程师, 从事油气田开发。