

# 非均相复合驱提高稠油油藏经济开发效益研究及效果

宋 珊 王 干 (中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司孤岛采油厂, 山东 东营 257231)

**摘要:** 实践证明化学驱技术是大幅度提高原油经济采收率的有效手段之一, 要实现 I、II 类化学驱资源全部覆盖, 剩余部分零散砂体及区块结合部储量含水较高, 但采出程度较低, 仍有进一步提高经济采收率的潜力, 为进一步提高该类储量采收率, 根据选区原则, 选取了未实施过化学驱, 地下原油粘度小于  $1000\text{mPa}\cdot\text{s}$ , 储层发育连通状况好, 采出程度低, 边水影响小, 井网相对完善, 井况较好的中一区馆 3-4 单元北部稠油井区进行化学驱提高经济采收率的可行性论证和方案编制研究, 进一步提升中一区馆 3-4 单元北部稠油开发效果和经济效益。项目实施后井区日油增加 23 吨, 含水下降 1.1 个百分点, 开发效果得到改善, 对同类型油藏提高开发效益具有借鉴意义。

**关键词:** 稠油; 化学驱; 采收率; 提高开发经济效益

## 1 单元简介

中一区馆 3-4 单元位于该油田披覆背斜构造顶部, 南北被一号、二号大断层切断, 东西两边分别与中二区和西区相连。区内构造比较简单, 构造平缓, 南高北低, 地层倾角  $1^\circ$  左右。

主力含油小层为馆 33、馆 35、馆 42、馆 44, 单层厚度大, 分布广、储量集中。砂层组属河流相正韵律沉积, 储层非均质性强, 在各相对均质段之间泥岩夹层很少, 主要是低渗透率的粉砂质泥岩或泥质粉砂岩, 胶结类型为孔隙接触式, 胶结物以泥质为主, 胶结疏松, 泥质含量较低, 平均泥质含量 5.0%, 碳酸盐含量为 3.94%。储层平均孔隙度为 33.1%, 空气渗透率为  $1810 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 原始含油饱和度为 63%。地下原油密度  $0.894\text{g}/\text{cm}^3$ 、原油粘度  $50\text{mPa}\cdot\text{s}$  左右, 地面原油密度为  $0.9544\text{g}/\text{cm}^3$ 、原油粘度平均为  $1132\text{mPa}\cdot\text{s}$ , 原始地层水总矿化度  $6022\text{mg}/\text{L}$ , 水型为  $\text{NaHCO}_3$  型。油藏原始地层压力  $12.35\text{MPa}$ , 压力系数 1.0, 原始地层温度  $70^\circ\text{C}$ , 温度梯度  $3.5^\circ\text{C}/100\text{m}$ , 属正常温度压力系统。

中一区馆 3-4 北部注聚剩余井组作为目标区块, 目的层位为馆 3 和馆 4 两个砂层组, 平均有效厚度 27.6 米; 水井总井数 10 口, 开井 10 口, 单井日注 73 方/天; 油井总井数 45 口, 开井 45 口; 单井日液 34.6t/d, 单井日油 2.2t/d, 综合含水 93.7%, 截止到目前采出程度 39.8%, 该单元油井过去采用蒸汽吞吐引效的降压开采方式, 随着转周轮次增加, 单井开发效果越来越差, 随着注汽成本的上漲, 热采开发效益也逐年降低, 亟需转换开发方式进一步提高采收率和经济开发效益。

## 2 油藏地质特征

### 2.1 地层特征

本次研究的目的层为馆 3 砂组的 32、33、35 小

层和馆 4 砂组的 42、43、44 小层。从地层剖面上来看, 馆 3 砂组的 32、33、35 小层和馆 4 砂组的 42、43、44 小层砂体均较为稳定发育, 连续性较好, 其中馆 4 砂组的 42、44 小层砂体最为发育, 厚度较大。

### 2.2 构造特征

中一区馆 3 顶面构造图中可以看出, 馆 3 砂组构造较为平缓, 构造倾角  $2 \sim 3^\circ$ 。馆 3、馆 4 砂组内各小层顶面构造形态在纵向上具有继承性, 中一区西北部发育一条走向北东-南西, 倾向北西的边界断层。

### 2.3 沉积储层特征

#### 2.3.1 岩矿特征

中一区馆 3、4 砂组岩石类型为岩屑质长石砂岩, 成分成熟度较低。碎屑颗粒胶结疏松, 分选中等-好, 次棱角状, 颗粒支撑, 点接触, 结构成熟度较高, 储集空间以原生孔为主。中一区馆 3 粒度中值平均值范围  $0.127 \sim 0.174$ , 泥质含量为 4.15%~7.44%; 馆 4 粒度中值平均为 0.163, 泥质含量平均为 7.22%。

#### 2.3.2 微相类型

从取心资料分析来看, 馆 3、馆 4 砂组岩性主要为粉砂岩和细砂岩, 韵律性表现为正韵律沉积, 主要发育曲流河河道、河道边缘及边滩微相。

#### 2.3.3 储层展布

馆 3、4 砂组为曲流河沉积, 物源来自于北部, 在相控基础上, 开展了储层展布的研究。馆 32 小层井区范围内砂体厚度 4~12m; 馆 33 小层井区范围内砂体厚度 2~12m; 馆 35 小层井区范围内砂体厚度 2~10m; 馆 42 小层井区范围内砂体厚度 4~12m; 馆 43 小层井区范围内砂体厚度 2~8m; 馆 44 小层井区范围内砂体厚度 8~16m。

#### 2.3.4 储层非均质性特征

本次孔渗模型借用《中一区馆 3 试验区精细油藏

描述》中的孔渗模型，以此对方案区油水井孔渗进行解释，明确储层层内、层间以及平面渗透率变化。从计算的 19N21 井来看，非均质变异系数大于 0.6，层内非均质性总体较强，层间渗透率总体相差不大，表现为较弱的层间非均质性。

### 2.3.5 微观孔喉特征

对取心井毛管压力曲线得到的孔喉参数进行统计，结果表明，最大孔喉半径平均值在 29.1–54.4  $\mu\text{m}$ ，孔喉半径平均值在 8.7–10.6  $\mu\text{m}$ ，孔喉类型为中孔中喉型，均质系数在 0.202–0.303，分选中等。根据取心井孔喉半径均值与渗透率关系，方案区渗透率范围 600–3200  $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，孔喉半径均值大约在 5–12  $\mu\text{m}$ ，平均约 8  $\mu\text{m}$ 。

## 3 开发现状分析及剩余油研究

### 3.1 开发现状分析

#### 3.1.1 注入能力分析

中一区馆 3 目前有注入井 6 口，平均单井日注水平 58.8  $\text{m}^3/\text{d}$ ，平均注入压力 8.9 MPa，跟该油田同类型化学驱项目比较，日注能力较好。中一区馆 4 目前有注入井 6 口，平均单井日注水平 76.2  $\text{m}^3/\text{d}$ ，平均注入压力 7.9 MPa，跟该油田同类型化学驱项目比较，日注能力较好，注水的经济效益高。

#### 3.1.2 产液能力分析

中一区馆 3 目前有油井 22 口，单井日液 29.6 t，综合含水 91.5%，单井产液能力较好，液量小于 20 t/d 油井 5 口。单井日产油 0.2–12.6 t/d，平均单井日产油 2.6 t/d。中一区馆 4 目前有油井 25 口，单井日液 43.8 t，综合含水 95%，单井产液能力较好，液量小于 20 t/d 油井 7 口，单井日产油 0.2–8.0 t/d 平均单井日产油 2.2 t/d。

### 3.2 数值模拟研究

通过数值模拟研究，开展平面和纵向剩余油分布规律研究。

#### 3.2.1 平面剩余油分布规律

从个单元的平面剩余油饱和度场图分析得出，平面剩余油相对较富集，仍存在大量剩余油，剩余油饱和度主要分布在 40%–45% 之间。南部曾注过聚区域含油饱和度相对较低，平面存在差异。

#### 3.2.2 纵向剩余油分布规律

从馆 3、馆 4 的纵向剩余油饱和度场图分析得出，各油层内部受水驱影响，顶部剩余油相对较富集。由中一区馆 3、馆 4 整个剩余油情况看，馆 3 剩余地质储量 82.8  $\times 10^4 \text{t}$ ，馆 3<sup>2</sup> 和馆 3<sup>5</sup> 剩余地质储量较丰富，占馆 3 剩余储量的 89.5%；馆 4 剩余地质储量 156.8  $\times 10^4 \text{t}$ ，馆 4<sup>2</sup> 和馆 4<sup>4</sup> 剩余地质储量较丰富，占馆

4 剩余储量的 82.7%，是提高经济采收率的主阵地。

## 4 非均相复合驱研究

### 4.1 井网优化设计

#### 4.1.1 井网演变历程

方案区投入开发时采用天然能量的开发方式，1987 年 10 月层系细分调整为馆 3、馆 4 两套开发层系；1991 年 12 月对井网进行局部加密，在油井间、水井间部署加密井，形成局部加密的行列式井网。

#### 4.1.2 井网调整方案

中一区馆 3 单元馆 3<sup>2</sup>、馆 3<sup>5</sup> 层均大面积连通，连通性好，馆 3<sup>3</sup> 层呈条带状分布。中一区馆 4 单元馆 4<sup>3</sup> 发育相对较差，馆 4<sup>2</sup>、馆 4<sup>4</sup> 层整体发育较好，连通性好。针对北部和南部区域存在的问题，开展井网优化设计，均衡注采，实现储量的最大化动用。

南部曾注过聚区域从注入井考虑采取侧钻、寻找替代井、转出等措施，注聚期间受效油井采取转出、寻找替代井、补孔等措施来改变注采流线。考虑储层发育状况，利用老井，优化设计井网实现储量的高效覆盖，考虑侧钻和新井的调整方案，总共设计注入井 12 口，生产井 43 口。

### 4.2 化学驱体系经济最优设计

#### 4.2.1 聚合物浓度设计

通过驱替相 / 原油粘度比与提高采收率关系曲线可以得知，溶液粘度和原油粘度比在 0.15–0.5 之间时，有明显提高采收率的作用。推荐选取分子量较高、具备较高粘弹性的聚合物产品，现场采用黄河水配制母液、现场产出水稀释的配制方式，保证驱替相溶液具有较高的粘度。本方案聚合物注入浓度推荐 2500 mg/L 为最佳注入经济效益值。

#### 4.2.2 表面活性剂筛选

基于束缚油滴活化条件，在油藏条件下，油水界面张力低于  $1 \times 10^{-2} \text{mN/m}$  才能使岩石表面的束缚油滴活化。室内对表面活性剂体系在目标区块油水条件下降低界面张力情况进行了测试，由结果可以看出，B19–101、B19–102、B19–103、B19–106、B19–107 活性剂体系具有较好的降低界面张力能力。针对目的层原油，对活性剂 B19–101、B19–102、B19–103、B19–106、B19–107 在不同浓度下进行了界面张力的测试，测试结果显示 B19–102、B19–107 这 2 种活性剂在一定浓度范围内界面张力均可达到超低。

#### 4.2.3 粘弹性颗粒驱油剂优选

依据 PPG 与孔喉匹配关系图版及单元平均驱替压力梯度 0.056 MPa/m、平均孔喉直径 16  $\mu\text{m}$ ，确定 PPG 弹性模量和 PPG 粒径与孔喉比，确保 PPG 与油藏孔

喉具有良好的配伍性。

综合上述实验结果表明,将 PPG、聚合物与表面活性剂复配,在保持高洗油效率、降低油相粘度的同时提高体相的粘弹性,增强体系的剖面调整和液流转向能力,更大程度的发挥体系中各组分的技术优势,达到大幅度提高经济采收率的目的。

#### 4.3 注入参数优化设计

方案区各注入参数按它们对开发效果影响的敏感程度,考虑技术和经济综合因素,段塞尺寸存在一个最优值,该方案区非均相复合驱优化的各个化学剂的段塞大小均为 0.45PV。在配方体系浓度和段塞大小优化设计的基础上,开展目标区注入速度优化,推荐矿场注入速度为 0.07PV/a。为了更好的发挥非均相复合驱油体系的驱油效能,开展单一主体段塞、前置调剖段塞+主体段塞、前置调剖段塞+主体段塞+后置保护段塞等三种不同注入方式优化,数值模拟结果表明,前置调剖段塞+主体段塞的两段塞注入方式非均相复合驱开采效果最佳。

#### 4.4 增油效果预测

利用化学驱数值模拟进行预测计算,中一区馆 3-4 北实施非均相复合驱后综合含水最低可降到 4.0%,数模预测提高采收率 13.04%,预测累积增油  $52.3 \times 10^4 \text{t}$ (图 1),阶段采出程度 17.1%,最终采收率 58.6%,当量吨聚增油 26.4t/t。

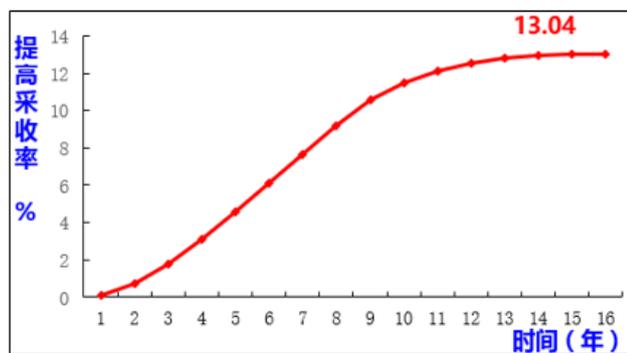


图 1 单元非均相复合驱提高采收率预测曲线

### 5 矿场实施方案

#### 5.1 方案设计工作量

为满足化学驱配产配注工作,需要新钻井 2 口,采取转注、侧钻、补孔、改层、套损井治理等工作量,共计 32 井次。

#### 5.2 配产配注方案

单井配产配注考虑:①依据矿场实际注入和产出情况;②井组保持注采平衡,注采比均保持 1.0 左右;③考虑平面及纵向相对均衡性,利用分层注入改善层间吸水状况。中一区馆 3 和馆 4 总共设计注入井 12

口,其中分层注入井 11 口,设计日注共  $1300 \text{m}^3/\text{d}$ ,受效油井 43 口,设计日产液量  $1700 \text{t}/\text{d}$ ,平均单井日液  $39 \text{t}/\text{d}$ 。

### 6 成果应用效果及经济效益

中一区 Ng3-4 北部稠油非均相复合驱项目经过剩余油研究和注入体系技术研究,指导实施了中一区 Ng3-4 北部稠油非均相复合驱,预计累增油  $52.3 \times 10^4 \text{t}$ ,项目采收率提高 13.04%。截止到目前,整个项目的开发现状得到明显的改善,已经有 6 口油井见到注聚效果,项目日油由  $81 \text{t}/\text{d}$  上升至  $10^4 \text{t}/\text{d}$ ,日油增加  $23 \text{t}/\text{d}$ ,含水由 94.9% 下降至 93.8%,下降 1.1%,实现累增油 0.1432 万吨。与以往该区域采用稠油热采方式开发相比,节约了至少 5 口井的注汽成本,吨油利润由 1248 元增至 1560 元,吨油操作成本由 802 元降至 690 元,创经济效益 58.71 万元。

### 7 认识及结论

中一区 Ng3-4 北部稠油非均相复合驱项目通过油藏描述及开发技术研究,确定了开发方向,有效的改善了开发效果,提高了储量动用程度和采收率,提高了经济效益,同时也为该油藏其它聚驱油藏提高经济采收率探索一条新的思路,而且对同类型油藏的开发具有重要借鉴意义和广阔的推广应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 侯建,郭兰磊,元福卿.胜利油田不同类型油藏聚合物驱生产动态的定量表征[J].石油学报,2021,29(4):577-581.
- [2] 侯健,赵辉,杜庆军.影响聚合物增油动态的敏感参数研究[J].石油天然气学报,2021,29(1):118-121.
- [3] 王美洁,韩力,邓伟兵等.区块整体调驱优化设计技术研究和应用[J].新疆石油科技,2022,28(1):19-24.
- [4] 曲同慈.辽河盆地西部凹陷特超稠油油藏利用水平井方式提高采收率研究[D].青岛:中国海洋大学,2021.
- [5] 张贤松,王海江,唐恩高,等.渤海油区提高采收率技术油藏适应性及聚合物驱可行性研究[J].油气地质与采收率,2021(5):121-123.
- [6] 董庆生.卫古集沙一段油藏提高开发效益研究[J].环球市场,2021(1):1-3.
- [7] 刘同军,刘成彦,任鹏.提高油藏开发效益配套技术研究和应用[J].建筑工程技术与设计,2022(20):135-137.

#### 作者简介:

宋姗(1991-)女,汉族,山东临清人,工程师,硕士研究生,从事工作:油藏开发。