

引用格式:杨勇,曹绪龙.高含水老油田化学驱综合治理新方法及工程实践路径[J].油气地质与采收率,2024,31(1):63-71.  
YANG Yong, CAO Xulong. New comprehensive management method and engineering practice path for mature oilfields with high water cut[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(1): 63-71.

## 高含水老油田化学驱综合治理新方法及 工程实践路径

杨勇<sup>1,2</sup>, 曹绪龙<sup>2</sup>

(1. 北京大学材料科学与工程学院, 北京 100000; 2. 中国石化胜利油田分公司, 山东 东营 257000)

**摘要:**针对胜利高含水老油田化学驱在科学、技术、管理、工程四个角度面临的开发矛盾,以渤76块为典型单元,在工程实践中进行具体对策分析,构建了“适、专、快、集”的老油田化学驱综合治理新方法。“适”指在老油田科学开发方式转化上,构建不同油藏类型老油田化学驱最佳介入时机模型,提出了在含水率相对较低的阶段,是适合化学驱的有利时机,高效开发方式需“适”介入。“专”指在老油田开发技术应用上,改变传统聚合物先溶解后注入的开发思路,研制可控相转化聚合物,使聚合物先注入后溶解,解决炮眼剪切降解的难题,提高油水流量控制能力,老油田开发矛盾需“专”治理。“快”指在老油田综合管理模式上,改变传统方式,即矿场提问题、研究院设计方案、化工厂生产驱油剂的“串联”管理模式,提出充分发挥矿场、研究院、生产厂三方优势的“并联”管理模式,形成针对单一油藏的产品工业化工艺包以及产业化落地方案,老油田开发技术实现“快”转化。“集”指在老油田工程应用实践上,打破老油田化学驱地面大规模建站的工程工艺模式,采用集约化撬装配注设备,实现老油田化学驱的集约快速配注,老油田工程工艺实现“集”应用。运用上述方法,在胜利油田渤76块综合含水率上升初期,实施由水驱转为可控相转化聚合物驱,实施后一年即见到明显的降水增油效果,单井日产油水平增加8.6 t/d,综合含水率降低3.1%,验证了综合治理模式的可行性,为高含水老油田化学驱高效开发提供了有效路径。

**关键词:**高含水老油田;高质量发展;综合治理新方法;提高采收率;工程实践

文章编号:1009-9603(2024)01-0063-09

DOI:10.13673/j.pgre.202305048

中图分类号:TE341

文献标识码:A

## New comprehensive management method and engineering practice path for mature oilfields with high water cut

YANG Yong<sup>1,2</sup>, CAO Xulong<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Peking University, Beijing City, 100000, China;

2. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

**Abstract:** In response to the development issues faced by chemical flooding in the mature Shengli Oilfield with high water cut in terms of science, technology, management, and engineering, Block Bohai 76 was taken as a typical unit, and the specific countermeasures were analyzed in engineering practice. A new comprehensive management method was constructed for chemical flooding in mature oilfields: “Appropriate, Specialized, Fast, and Integrated.” Among them, “Appropriate” refers to the construction of optimal changing timing models for chemical flooding in different oil reservoirs of mature oilfields during the transformation of scientific development methods for mature oilfields. It was proposed that the favorable changing timing for chemical flooding is at the relatively low water cut stage, and efficient development methods should be used in an appropriate manner. “Specialized” refers to changing the traditional development approach of dissolving polymers before injection in the application of development technology for mature oilfields, developing controllable phase conversion polymers to enable polymer injection followed by dissolution, over-

收稿日期:2023-05-16。

作者简介:杨勇(1982—),男,山东鄄城人,正高级经济师,在读博士研究生,从事油田勘探开发方面的研究。E-mail: yangyong@sinopec.com。

coming the problem of borehole shear degradation, and improving the ability to control oil-water fluidity. The development issues in mature oilfields need to be specifically addressed. “Fast” refers to the transformation in the traditional comprehensive management mode of mature oil fields, which involves a “serial” management mode of problems proposed by fields, schemes designed by research institutes, and oil displacement agents produced by chemical plants. A “parallel” management mode was proposed that fully leveraged the advantages of fields, research institutes, and production plants, and the industrial chemical technology packages and industrialization implementation plans were formed for a single oil reservoir. The development technology of mature oilfields can thus achieve fast transformation. “Integrated” refers to breaking the engineering process model of large-scale construction of chemical flooding stations in mature oilfields during engineering application practice, adopting integrated assembly of injection equipment, achieving the rapid and integrated injection allocation of chemical flooding in mature oilfields, and thus ensuring “integrated” application of engineering processes in mature oilfields. A transition from water flooding to controllable phase conversion polymer flooding was implemented using the above method in Block Bohai 76 of Shengli Oilfield at the early stage of the comprehensive water cut increase. The significant water cut reduction and oil increase effects were observed after one year. The average oil production rate per well increased by 8.6 t/d, and the comprehensive water cut decreased by 3.1%. The feasibility of the comprehensive management model was verified, providing an effective path for the efficient development of chemical flooding in mature oilfields with high water cuts.

**Key words:** mature oilfields with high water cut; high-quality development; new comprehensive management method; enhanced oil recovery; engineering practice

随着石油资源需求的日益增加,我国对外原油依存度逐年攀升,2018年至2022年,已连续5 a超过70%<sup>[1-4]</sup>。加大石油勘探开发力度,夯实国内产量基础,提高自我保障能力,是保障国家能源安全的基础。目前,我国已开发的老油田已逐渐进入高含水、高采出程度的“双高”开发阶段,提高采收率难度加大,同时仍有大量剩余油滞留地下,具有较为丰富的物质基础。

国内外技术创新和应用实践证明,化学驱技术能够大幅度提高“双高”开发阶段老油田采收率<sup>[5-8]</sup>。在取得重要进展的同时,传统化学驱油技术也存在四方面的问题:一是油藏工程管理介入时机有待明确。油田进入高含水开发阶段,高耗水层带发育,水窜严重,导致动态非均质性加强,化学驱油水流量控制面临挑战,介入时机选取不适当会使开发效果和效益受到影响。二是传统化学驱油剂的抗炮眼剪切能力有待提高。传统化学驱配注流程采用先溶解后注入的方式,而此方式会使舒展的聚合物分子链经受炮眼剪切,导致黏度大幅下降。三是目前的技术在工程实践中的转化周期有待缩短。目前普遍采用的工程转化模式须完成上一环节才能开展下一环节,从油藏开发矛盾显现到化学驱实施,一般需要1~2 a的时间,研制新型驱油剂及体系,实施时间会再延长2~5 a,加大了管理成本、时间成本<sup>[9-10]</sup>。四是矿场地面配套工程对绿色开发的适应性有待提高。目前矿场为了节约水资源、减少回注压力,普遍采用产出水配制聚合物溶液,其中的还原性离子产生的自由基会使聚合物发生化学降解,

并且由于配注流程复杂,需要配套多设备,占地面积较大。因此,在系统分析传统化学驱实施模式的基础上,构建了高含水老油田综合治理新方法。在确定老油田转化学驱最适介入时机后,发挥油田研究院、油田生产单位和化工厂三方优势,协调油藏地质研究、开发矛盾分析、新型驱油剂研制、工业化生产、矿场方案编制、配注站建设、现场实施等同步进行,通过多部门、多专业联合攻关,技术迭代升级,提升组织效益和工程管理效益,建立老油田高质量发展新模式。以胜利油田渤76块为例,开展治理实践,为高含水老油田大幅度提高采收率提供技术和管理支撑。

## 1 胜利高含水老油田化学驱开发矛盾现状分析

胜利高含水老油田多为中高渗透水驱油藏,目前采收率仅为36.7%,亟需转换开发方式。通过科学研究和大量矿场实践表明,化学驱是解决中高渗透油藏含水率上升,实现原油采收率大幅度提高的重要技术手段<sup>[11-16]</sup>。现阶段,胜利油田主要形成了以聚合物为基础的聚合物驱、无碱二元复合驱、三元复合驱和非均相复合驱等系列化学驱油技术。2022年,胜利油田化学驱单元年产量为270×10<sup>4</sup>t,占原油总产量(2 340×10<sup>4</sup>t)的11.5%<sup>[17-21]</sup>。然而,随着老油田进入特高含水(含水率≥90%)的后期开发阶段,化学驱的高效开发也存在着以下矛盾。

### 1.1 开发方式转换时机有待明确

化学驱介入时机是影响化学驱增效的主要因素。传统观念认为,化学驱作为三次采油的重要方法,是在水驱之后开展的开采方式。经过矿场实践发现,在含水率相对较低的阶段,开发方式及时转为化学驱,提高采收率幅度更高,含水率降低的幅度也更大,但是这个时机难以科学精确确定,不同区块在不同的含水率状态实施转换,最终提高采收率效果差异较大。以胜利油田二类油藏聚合物驱为例,孤岛油田中二南中地质储量为 $1\ 185\times 10^4\text{ t}$ ,综合含水率达到94.9%后,转注化学驱,综合含水率降至83.6%,下降幅度高达11.3%。孤岛油田中一区Ng3-6地质储量为 $1\ 047\times 10^4\text{ t}$ ,综合含水率达到95.6%后,转注化学驱,综合含水率最低降至86.6%,下降幅度为9.0%。孤岛油田中二中聚合物驱地质储量为 $2\ 188\times 10^4\text{ t}$ ,转化学驱后,综合含水率从96.3%最低降至90.6%,下降幅度仅为5.7%。结合表1可以看出,受油藏开发阶段以及化学驱资源条件的影响,不同含水阶段实施化学驱的效果有着明显的差异。因此,如何科学地判断合适的化学驱介入时机,是实现大幅度提高采收率和提高经济效益双赢而亟需解决的问题。

### 1.2 传统方式的抗剪切能力有待提高

传统化学驱技术的配注工艺一直采用地面溶解后注入地下的方式。然而,聚合物溶液在流经炮眼时,高强度的剪切作用会导致聚合物分子链断裂降解,造成不可逆的黏度损失,黏度损失率高达40%~60%。胜利油田聚合物驱经过几十年的发展,针对高温、高盐、非均质性强的油藏特点,所研

发聚合物逐渐由高分子量到超高分子量,从均聚到共聚,形成了适应不同油藏类型的聚合物,可覆盖地质储量达 $12.95\times 10^8\text{ t}$ (表2)。但是聚合物相对分子质量越高意味着分子链受高强度剪切的影响越大,依然面临黏度损失的问题。

### 1.3 技术的工程转化周期有待缩短

传统的技术推广流程针对矿场提出的问题,先由研究院进行对策分析、实验研制、工业化设计和方案编制,然后通过相关管理部门进行物资供应、方案审查及标准构建,再由化工厂进行样品的提供和工业化生产,最后由采油单位进行地面建设、方案实施和矿场跟踪,从而使新技术得以推广应用。对于研究院、管理部门、化工厂、采油单位而言是“串联”管理模式(图1),其特点是上一环节完成后才能开展下一环节,导致周期长、时效性弱。

比如针对聚合物驱后油藏,突破传统均相体系提高采收率技术,在已有聚合物驱油体系中,通过加入黏弹性颗粒驱油剂和具有超强洗油能力的表面活性剂,形成固液共存、具有各向异性特征的驱油体系,即非均相复合驱油体系。2003年,提出概念并成立项目组开展基础研究。2008年,在实验室内合成出具有黏弹特性的颗粒驱油剂小样,经过对中试样品的配方的不断调试,最终于2010年完成黏弹性颗粒驱油剂的工业化生产。同年,非均相复合驱技术在孤岛油田中一区Ng3进行先导试验,综合含水率由98.3%下降到79.8%,下降了18.5%,提高采收率8.5%,最终采收率高达63.6%,挑战了陆相碎屑岩油藏原油采收率60%的极限。截至目前,先后在孤岛、孤东、胜坨及埕东等4大主力油田

表1 聚合物驱典型单元统计  
Table1 Statistics of typical units of polymer flooding

序号	聚合物驱项目	地质储量/ $10^4\text{ t}$	转化学驱 综合含水率/%	综合含水率 下降幅度/%	提高采收率/%
1	孤岛油田南区渤72	471	92.2	14.2	12.9
2	孤岛油田中二南中	1 185	94.9	11.3	11.9
3	孤岛油田西区南	880	95.1	11.5	10.1
4	孤岛油田中一区Ng3-6	1 047	95.6	9.0	9.6
5	孤岛油田南区渤61	920	96.0	7.5	9.5
6	孤岛油田中二中	2 188	96.3	5.7	7.9

表2 聚合物类型及适应油藏  
Table2 Polymer types and suitable reservoirs

聚合物类型	聚合物相对分子质量	适应胜利油藏类型	资源量/ $10^8\text{ t}$
高分子量均聚部分水解聚丙烯酰胺	1 500万以上	I类油藏	3.79
超高分子量均聚部分水解聚丙烯酰胺	2 000万以上	II类油藏	2.70
超高分子量多元共聚物	3 000万以上	III类油藏	6.46

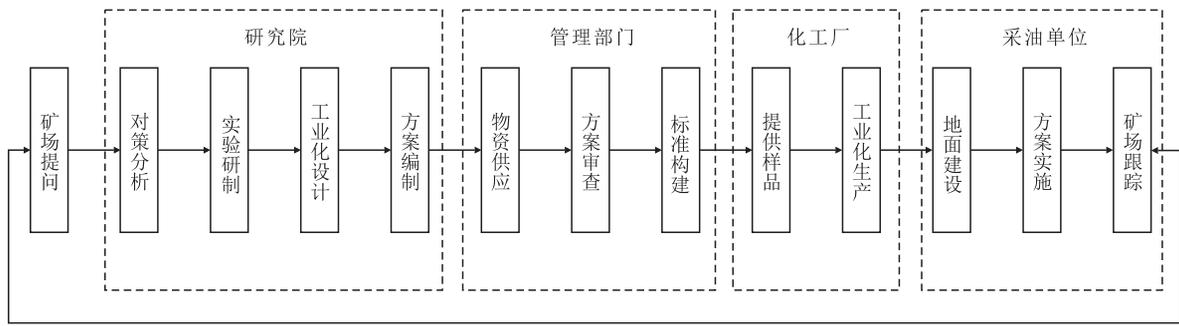


图1 “串联”管理模式流程  
Fig.1 “Serial” management mode

实施非均相复合驱项目24个,动用地质储量 $1.2 \times 10^8$  t,累计产油量为 $198 \times 10^4$  t,提高采收率7%~21%。

非均相复合驱技术从油藏开发矛盾显现到化学驱实施,经历了驱油剂研发、驱油体系设计、试验区筛选、实施方案编制及地面工程和现场实施,转化周期长达9 a,加大了油田的管理成本、时间成本 and 风险,同时也拖延了技术的见效时间。

#### 1.4 地面工程对绿色开发的适应性有待提高

为了减少回注压力,矿场实践中多采用产出水作为配注用水配制聚合物溶液。然而产出水中常含有二价铁、硫化物等还原性物质,在配制过程中遇到溶解氧,易产生氧化性强的自由基使得聚合物发生化学降解,从而大幅度降低聚合物溶液的黏度。其次,实施化学驱时需要建立一整套分散、熟化、增压、混配、外输等配注流程,流程长、节点多,因此所需的占地面积较大。此外,传统化学驱都是针对相对整装油藏区块建立固定化学驱配注站,当这个区块开发完毕后,配注站无法进行有效再利用。

## 2 高含水老油田化学驱开发综合治理对策

基于胜利高含水老油田当前的化学驱开发矛盾现状,确定储层物性好、注采井网完善、具备实施化学驱工程条件作为筛选原则,以筛选典型油藏作为未来化学驱资源接替阵地。通过对胜利油田1100多个单元的构造、储层物性、开发状况进行梳理,确定含水率高、油藏构造简单、原油黏度适中的渤76块作为典型单元。该区块位于孤岛油田南区西南部,是一个被断层复杂化的断阶区,为具有边底水的构造-岩性稠油油藏,含油面积为 $3.01 \text{ km}^2$ ,地质储量为 $884 \times 10^4$  t。其馆陶组属河流相沉积,胶

结疏松,储层非均质性强,内部夹层发育,岩性以细砂岩为主,胶结类型为孔隙接触式。主要开发层系为Ng1+2—Ng4砂层组,油藏埋深为1160~1300 m,平均孔隙度为34.7%,平均空气渗透率为1674 mD,原始含油饱和度为58.9%,原始油藏温度为 $70^\circ\text{C}$ ,地面原油密度为 $0.97 \sim 0.99 \text{ g/cm}^3$ ,平均为 $0.984 \text{ g/cm}^3$ ,地面原油黏度为 $3950 \sim 7648 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,Ng4砂层组原油黏度平均为 $5100 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,属于高孔高渗透普通稠油油藏。下面以渤76块为实例具体分析高含水老油田化学驱开发的综合治理对策。

#### 2.1 “适”介入科学开发思路

传统的化学驱介入时机通常选在含水率达到92%~95%,但在含水率较低时期转换为化学驱的实例相对较少,那么关于介入时机的选取,是否存在更加合适的选择?为回答这一问题,通过建立油藏数值模拟模型,采用五点法井网,以提高采收率作为潜力评价指标,研究不同转化学驱时机对开发效果和油藏效益最大化的影响,结果(图2,图3)表明,随着转化学驱时综合含水率的升高,提高采收率幅度逐渐降低,当综合含水率在70%~80%时提

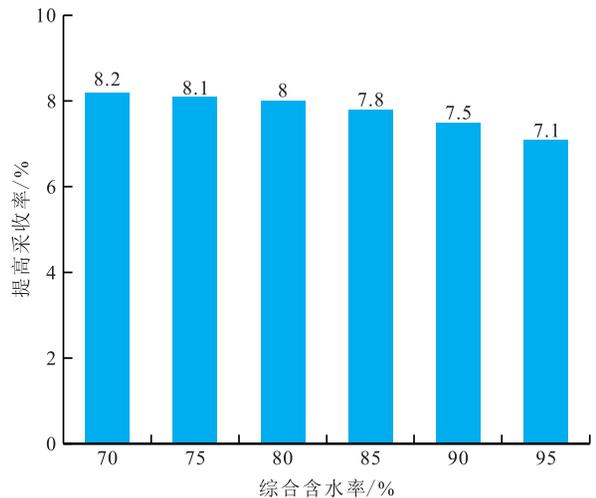


图2 化学驱提高采收率与介入时机关系曲线  
Fig.2 Relationship between enhanced oil recovery under chemical flooding and changing timing



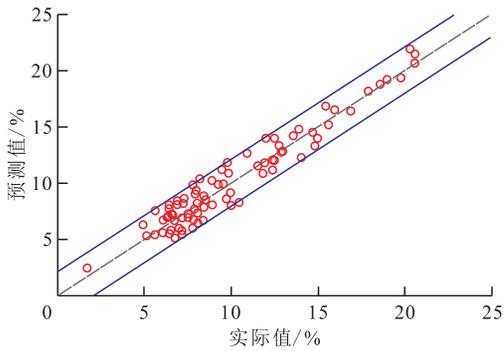


图4 预测值与实际值对比

Fig.4 Comparison between predicted value and actual value

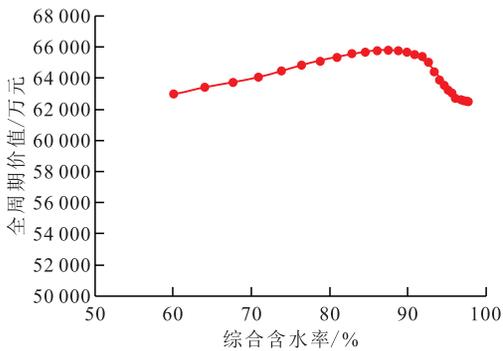


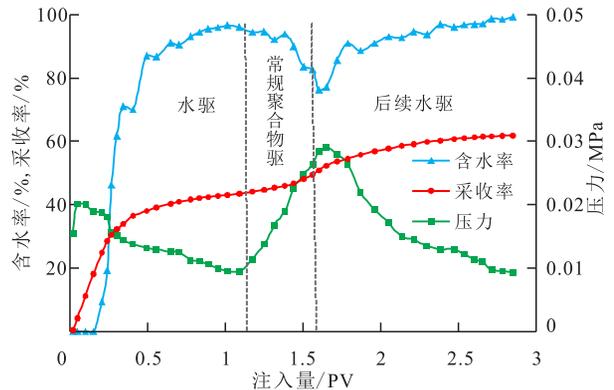
图5 不同介入时机化学驱项目全周期价值

Fig.5 Full-cycle value of chemical flooding projects at different changing timings

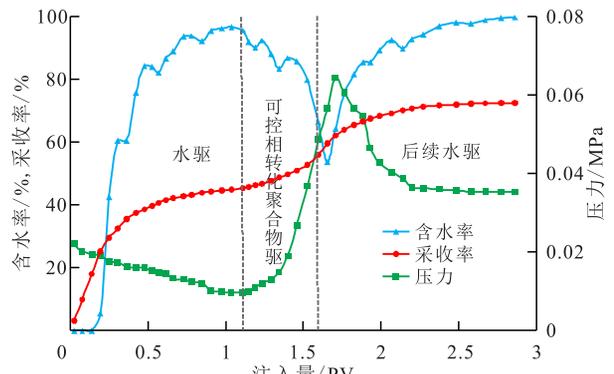
性。试验区累计蒸汽吞吐69井次,累计注蒸汽量为 $17.9 \times 10^4 t$ ,单井最大蒸汽吞吐9个周期,初期油气比为1.39。随着吞吐周期增多,油气比降低,目前该块综合含水率为80.0%,处于转化学驱最佳时机,因此需转变开发方式提升开发效果。

### 2.2 “专”治理技术研发思路

渤76块受长期蒸汽吞吐的影响,近井储层受热蒸汽作用而出现骨架颗粒溶解、迁移、堆积导致非均质性增强。为解决渤76块油藏开发矛盾和聚合物驱炮眼剪切降解问题,设计研发了一种可控相转化聚合物驱油剂以进行“专”治理。该可控相转化聚合物驱油剂在配制时呈分散凝胶相态而非舒展的分子链,可抵抗剪切降解,在模拟炮眼剪切后,黏度保留率为89.2%,明显高于常规聚合物的46.2%。注入地层后,可控相转化聚合物在近井储层内为具有高黏弹性颗粒,可实现优势渗流通道高效调堵,改善水窜现象;在运移过程中形成凝胶颗粒和水溶性聚合物混合液,颗粒变形能力强,可实现深部调驱;在远井储层溶解增黏,黏度保留率高,可改善水油流度比,在油藏深部实现扩大波及体积。物理模拟实验结果表明,提高采收率幅度为27.2%,高于常规聚合物驱的18.3%,采收率增值提高了8.9%(图6)。



a—常规聚合物驱



b—可控相转化聚合物驱

图6 常规聚合物与可控相转化聚合物驱油曲线对比

Fig.6 Comparison of oil displacement curves between conventional polymer and controllable phase inversion polymer

### 2.3 “快”转化管理运行思路

在现场提出问题之后,研究院首先开始进行对策分析。形成对策后,通过物资供应部门购买工业化原料,并在室内进行研制实验。物资供应部门大幅度简化采购管理流程,从市面上直接针对性购买研究院所需原料。室内研制之后,研究院与化工厂实时交流,模拟工业化生产工艺,通过性能评价结果反馈,优化各项工艺参数和流程,设计确定工业化工艺包。之后,研究院进行油藏方案编制,并由相关部门进行方案审查和标准构建,与此同时,化工厂进行工业化生产,采油单位进行地面工程设计、选址。最后进行方案实施及矿场跟踪。对于研究院、管理部门、化工厂、采油单位而言是“并联”管理模式(图7),其特点是各环节并行开展,通过整合各方资源,解决原料采购、生产企业选商、合同签订、产品中试和工业化过程中的瓶颈问题,以实现“快”转化管理运行。

针对可控相转化聚合物特点,优化工业化设备、流程及参数,设计聚合物水解机,采用固体碱与胶粒混合的方式同时水解。整个水解过程胶粒与固体碱揉合作用时间长,增加了水解反应的表面

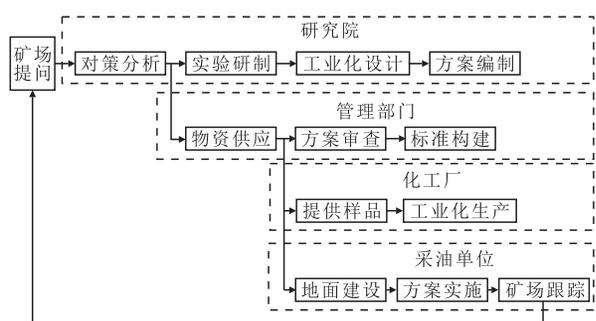


图7 “并联”管理模式流程  
Fig.7 “Parallel” management mode

积,保证水解反应均匀、完全,水解度控制误差在0.8%。优化流化床烘干设备,控制烘干温度、时间及内压,保障聚合物干粉固含量和相转化性能达标,形成可控相转化聚合物的工业化生产流程,可实现3 t/釜连续生产工业化产品。从驱油剂分子结构设计到工业化生产再到矿场应用只用205 d,实现实验室样品向工业化产品的“快”速转化。

### 2.4 “集”应用工程工艺思路

为保证可控相转化聚合物的注入质量,并高效发挥化学剂的作用,以“绿色环保、低能耗、重复利用、少征地”为原则,对化学驱地面设备和配注工艺进行精简和优化,实现工程工艺“集”应用。具体对策如下:①水质处理提前介入,保证配注水的达标。对配注水提前处理,如对来水进行曝氧处理或加入一定量的除硫保黏剂等,除去影响聚合物黏度或稳定性的影响因素,从而保证配注聚合物的黏度。制定了化学驱配注水质的指标要求,并实时监控配注水的水质变化情况,严格把关。②实施短流程配注。传统的配聚分散熟化时间比较长、流程也比较长,实施短流程配聚一方面可以提高配聚效率,将配聚时间从2 h缩短到30 min,减少聚合物在管线时间,降低沿程损失,另一方面减少占地面积及地面建设,降低成本。③采用撬装化设备,可以实现地面快速建设,缩短建设周期。随着油田开发进一步深入,化学驱由整装大区块向零散小区块转化,配注方式也由集中建站向分散配注转化。撬装设备的特点使得它在完成一个区块的配注任务之后,可以转移到下一个,实现进一步减少地面投资。

## 3 高含水老油田综合治理效果及展望

渤76块实施化学驱后,平均单井日注水平为90 m<sup>3</sup>/d,井口黏度在40 mPa·s以上,相对化学驱前,单元日产液量保持稳定,日产油水平明显上升,增

加了8.6 t/d,综合含水率降低3.1%,初步证明了可控相转化聚合物驱技术的可行性。在配注过程中,由于可控相转化聚合物在注聚泵、管线、静混器、炮眼等存在剪切破碎,粒径的减小,使得监测井底的返排液中可控相转化聚合物相转化时间缩短,为此,及时调整可控相转化聚合物的配方,提高室内相转化的时间,从而保证现场聚合物在遇到原油时完成相转化。采收率预计提高10.3%,投资减少20%,转化周期可缩短至1 a。

通过渤76块老油田水驱转化学驱开发方式的实例分析,可以证明,从科学、技术、管理、工程四个角度重新审视老油田开发现状,构建高含水老油田化学驱高效益开发新方法是可行的。该新方法包含“适、专、快、集”四个方面(图8):一是“高含水初期及时转化学驱”的老油田“适”转换。在中高含水及时转化学驱,有效预防高耗水层带发育,增加产油量同时大幅度降低成本,研发不同油藏类型老油田化学驱最佳介入时机预测模型,指导化学驱介入综合含水时机,实现全生命周期价值最大化。二是针对老油田传统开发技术,研发高含水老油田“专”治理驱油剂。通过研制可控相转化聚合物,使聚合物先注入后溶解,解决炮眼剪切降解的问题,提高油水流量控制能力。三是“多方并联合作”老油田技术“快”转化的管理运行,实现驱油剂工艺包设计、快速转化、迭代升级。整合三方优势资源,并联式管理,全过程共同研究,形成专治产品工业化工艺包。四是集合新型驱油剂研发、油藏方案、地面工程,物资供应等方面,形成化学驱工程整体设计方案,实现老油田化学驱“集”应用。采用撬装化配注设备,大幅缩减地面建设,大幅度提高配注效率,形成老油田化学驱工程整体设计方案。

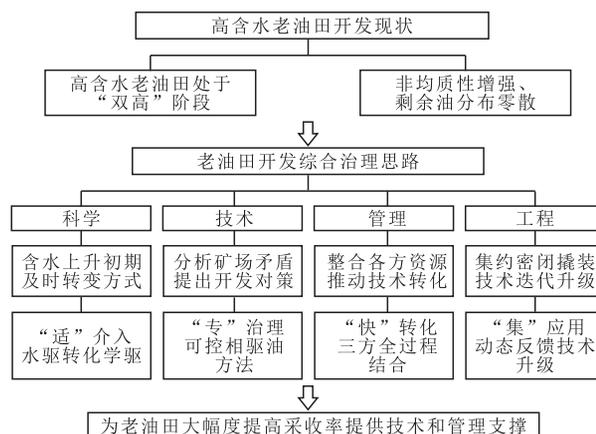


图8 高含水老油田综合治理管理路径  
Fig.8 Comprehensive management path of mature oilfields with high water cut

该综合治理模式不仅适用于胜利油田,对于全国开发到中后期、含水到中高含水期的老油田均具有较好的扩展适应性。并且,该综合治理模式不仅适用于高含水老油田,对于新油田的产能建设也具有较好的借鉴意义。此外,在未来老油田的进一步开发过程中,“适、专、快、集”的高含水老油田综合治理模式也可随着老油田开发的动态变化而辩证地进行调整,以更好地适应老油田开发要求,但归根结底还需要从油田的化学驱介入时机、技术开发手段、综合管理模式、高效工程工艺入手,系统地、全过程地分析老油田的开发现状,形成相应对策,为老油田进一步提高采收率提供理论模式指导。

#### 符号解释

- $a, b, c$  —— 模型特征参数,无量纲;  
 $N_{inj}$  —— 累计注入量,PV;  
 $x_1$  —— 介入时综合含水率,%;  
 $x_2$  —— 地层原油黏度,mPa·s;  
 $x_3$  —— 地层温度,°C;  
 $x_4$  —— 地层水矿化度,mg/L;  
 $x_5$  —— 注入段塞量,PV;  
 $x_6$  —— 段塞浓度,mg/L;  
 $\Delta R$  —— 化学驱阶段提高采出程度,%。

#### 参考文献

- [1] 孙焕泉. 高温高盐油藏化学驱提高采收率技术发展及思考[J]. 石油科技论坛, 2021, 40(2): 1-7.  
 SUN Huanquan. Development and opinions of chemical EOR technology for high-temperature and high-salinity reservoirs [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2021, 40(2): 1-7.
- [2] 孙焕泉, 杨勇, 王海涛, 等. 特高含水油藏剩余油分布特征与提高采收率新技术[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2023, 47(5): 90-102.  
 SUN Huanquan, YANG Yong, WANG Haitao, et al. Distribution characteristics of remaining oil in extra-high water cut reservoirs and new technologies for enhancing oil recovery [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2023, 47(5): 90-102.
- [3] 程杰成, 吴军政, 吴昊, 等. 无碱三元乳化驱油体系[J]. 石油学报, 2023, 44(4): 636-646.  
 CHENG Jiecheng, WU Junzheng, WU Hao, et al. Alkali-free three-component emulsification flooding system [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(4): 636-646.
- [4] JOUENNE S. Polymer flooding in high temperature, high salinity conditions: Selection of polymer type and polymer chemistry, thermal stability [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 195: 107545.
- [5] 程杰成, 周泉, 周万富, 等. 低初黏可控聚合物凝胶在油藏深部优势渗流通道的封堵方法及应用[J]. 石油学报, 2020, 41(8): 969-978.  
 CHENG Jiecheng, ZHOU Quan, ZHOU Wanfu, et al. Plugging method of polymer gel with controllable low initial viscosity for dominant flow paths in deep reservoirs and its application [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(8): 969-978.
- [6] 王增林, 史树彬, 田玉芹, 等. 基于分子模拟的抗稀释度调控体系的分子结构与性能关系[J]. 油田化学, 2021, 38(1): 112-118.  
 WANG Zenglin, SHI Shubin, TIAN Yuqin, et al. Relationship between molecular structure and properties of anti-dilution fluidity regulation system based on molecular simulation [J]. Oilfield Chemistry, 2021, 38(1): 112-118.
- [7] 罗平亚, 李华斌, 郑焰, 等. 大庆油田疏水缔合聚合物-碱-表面活性剂三元复合驱提高采收率研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(6): 1-4.  
 LUO Pingya, LI Huabin, ZHENG Yan, et al. EOR by ASP of hydrophobic associated polymer-alkali-surfactant in Daqing oil field [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(6): 1-4.
- [8] 廖广志, 王强, 王红庄, 等. 化学驱开发现状与前景展望[J]. 石油学报, 2017, 38(2): 196-207.  
 LIAO Guangzhi, WANG Qiang, WANG Hongzhuang, et al. Chemical flooding development status and prospect [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(2): 196-207.
- [9] 曹绪龙, 刘煜, 曹伟东. 非均相复合驱中黏弹性颗粒驱油剂与储层孔喉匹配关系[J]. 石油学报, 2022, 43(2): 262-269.  
 CAO Xulong, LIU Yu, CAO Weidong. Matching relation relation between preformed particle gel and reservoir pore throat during heterogeneous phase combination flooding [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(2): 262-269.
- [10] 孙焕泉. 胜利油田三次采油技术的实践与认识[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 262-266.  
 SUN Huanquan. Practice and understanding of tertiary recovery in Shengli Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 262-266.
- [11] 曹绪龙, 季岩峰, 祝仰文, 等. 聚合物驱研究进展及技术展望[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(6): 8-16.  
 CAO Xulong, JI Yanfeng, ZHU Yangwen, et al. Research advance and technology outlook of polymer flooding [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(6): 8-16.
- [12] 曹绪龙. 非均相复合驱油体系设计与性评价[J]. 石油学报: 石油加工, 2013, 29(1): 115-121.  
 CAO Xulong. Design and performance evaluation on the heterogeneous combination flooding system [J]. Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing, 2013, 29(1): 115-121.
- [13] 孙焕泉. 聚合物驱后井网调整与非均相复合驱先导试验方案及矿场应用——以孤岛油田中一区Ng3单元为例[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(2): 1-4.  
 SUN Huanquan. Application of pilot test for well pattern adjusting heterogeneous combination flooding after polymer flooding-

- case of Zhongyiqu Ng3 block, Gudao oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(2): 1-4.
- [14] 孙焕泉,曹绪龙,李宗阳,等.基于储层孔喉匹配的非均相复合驱技术研究与矿场实践——以胜坨油田一区沙二段1-3砂组聚合物驱后单元为例[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(5): 53-61.
- SUN Huanquan, CAO Xulong, LI Zongyang, et al. Research on heterogeneous combination flooding technology based on matching between system and reservoir pore throat and its field application: A case of post-polymer flooding Es<sub>2</sub>1-3 in Shengtuo area, Shengtuo Oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(5): 53-61.
- [15] 吴行才,韩大匡,卢祥国,等.微凝胶颗粒水分散液体系在多孔介质中的驱替机理[J]. *地球科学*, 2017, 42(8): 1 348-1 355.
- WU Xingcai, HAN Dakuang, LU Xiangguo, et al. Oil displacing mechanism of soft microgel particle dispersion in porous media [J]. *Geoscience*, 2017, 42(8): 1 348-1 355.
- [16] 卜亚辉.基于适配关系的高含水油藏流场调控优化方法[J]. *断块油气田*, 2022, 29(5): 692-697.
- BU Yahui. Optimization method of flow field control in high water cut reservoir based on matching relationship [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(5): 692-697.
- [17] 杨冰,傅强,官敬涛,等.特高含水油藏不同井网流场调整模拟与驱油效率[J]. *油气藏评价与开发*, 2023, 13(4): 519-524.
- YANG Bing, FU Qiang, GUAN Jingtao, et al. Oil displacement efficiency based on different well pattern adjustment simulation in high water cut reservoirs [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(4): 519-524.
- [18] 王锐,伦增珉,吕成远,等.中外提高采收率新技术研究现状及发展趋势[J]. *油气地质与采收率*, 2021, 28(5): 81-86.
- WANG Rui, LUN Zengmin, LÜ Chengyuan, et al. Research status and development trends of worldwide new technologies for enhanced oil recovery [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(5): 81-86.
- [19] 张海燕,刘海成,肖武,等.特高含水期油藏流场调整必要性定量评价方法[J]. *当代石油石化*, 2021, 29(7): 33-37.
- ZHANG Haiyan, LIU Haicheng, XIAO Wu, et al. Quantitative characterization method for flow field adjustment necessity in extra-high water cut stage [J]. *Contemporary Petroleum and Petrochemical*, 2021, 29(7): 33-37.
- [20] 张健.海上高含水油田非连续化学驱模式研究[J]. *中国海上油气*, 2023, 35(1): 70-77.
- ZHANG Jian. Study on discontinuous chemical flooding model of offshore high water cut oilfield [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(1): 70-77.
- [21] 郭长春.基于密闭取心井的非均相复合驱后剩余油分布特征与变化规律——以孤岛油田中一区Ng3为例[J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(5): 111-117.
- GUO Changchun. Distribution characteristics of remaining oil after heterogeneous combination flooding based on sealed cored well: A case study in Zhongyi area Ng3, Gudao Oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(5): 111-117.

编辑 经雅丽