

李华斌 著 

三元复合驱新进展 及矿场试验



科学出版社
www.sciencep.com

三元复合驱新进展 及矿场试验

李华斌 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从三元复合驱提高采收率的原理和途径出发,对其基础理论研究、数值模拟技术、方案的优化设计以及矿场试验方法进行了详细介绍。作者得出油水瞬时动态界面张力达到 10^{-2} mN/m 数量级,其驱油效果与平衡界面张力达到 10^{-3} mN/m 数量级超低值的基本相当的重要结论,不仅增加了表面活性剂的种类和范围,还可以大幅度降低,甚至不需外加化学碱,而大幅度提高复合驱的整体技术经济效果。本书还重点介绍了注入程序、注入方式、段塞大小以及化学剂浓度对驱油效果的影响;强调了驱油体系黏度在非均质严重地层中对提高采收率的重要作用。最后,本书提出了在矿场试验中,油水井工作制度按无因次等孔隙体积注采进行配产配注的新观点。

本书可供油气田开发工程及提高采收率技术等相关专业的研究人员及三次采油技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

三元复合驱新进展及矿场试验 李华斌著. —北京:科学出版社, 2007
ISBN 978-7-03-018909-7

I. 三… II. 李… III. 化学驱油-研究 IV. TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 062678 号

责任编辑:杨 震 袁 琦 吴伶俐/责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 5 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2007 年 5 月第一次印刷 印张: 26

印数: 1—1 500 字数: 519 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

碱/表面活性剂/聚合物三元复合驱是 20 世纪 80 年代发展起来的三次采油新方法。其实质是用廉价的碱部分地替代价格昂贵的表面活性剂。这种驱油方法使表面活性剂的有效浓度可降低到 $0.1\% \sim 0.3\%$ ，因此能大幅度降低有效化学驱中表面活性剂的用量。此外，碱剂的加入又降低了表面活性剂和聚合物的吸附滞留损失，特别是价格昂贵的表面活性剂，降低幅度可达到 50% 以上；同时，碱剂与原油中的有机酸反应生成石油酸皂，石油酸皂可与外加表面活性剂产生有利的协同效应。与聚合物驱相比，它不仅可以提高油层的波及体积，还能进一步提高原油的驱油效率。因此，该技术是继聚合物驱后的又一可以大幅度提高原油采收率的新技术，是未来提高采收率技术的发展方向和趋势。

目前，三元复合驱技术在国外仍处在室内研究和先导性试验阶段。美国先后在 West Kiehl 油田和 Cambridge 油田进行了小型先导性矿场试验，并取得了一定的效果。我国三元复合驱技术也取得了突破性进展。室内和矿场试验结果表明：复合驱可比水驱提高采收率 20% OOIP 左右（水驱达到经济极限时的采出程度只有 40% OOIP 左右）。也就是说，如果三元复合驱能够得到大规模推广应用，增采的油量相当于又新发现了 50% 的可采储量。因此，其具有重要的意义和广阔的应用前景。

但是，该技术目前仍然存在一些问题，甚至是严重的问题：第一，为了达到比水驱提高采收率 20% OOIP 的驱油效果，油水平衡界面张力必须达到 10^{-3} mN/m 数量级的超低值。然而，大量的表面活性剂及其复配体系与原油的界面张力要达到如此低的程度非常困难，严重限制了表面活性剂的种类和来源。目前，国内完全可以达到这种苛刻要求的表面活性剂的种类和来源非常少且价格十分昂贵。第二，为了使油水平衡界面张力达到 10^{-3} mN/m 数量级的超低值，体系中必须加入大量的化学碱剂，甚至是碱性极强的 NaOH。因此，从理论上解决三元复合驱油水平衡界面张力不必达到 10^{-3} mN/m 数量级的超低值也能达到理想驱油效果的问题，不仅可以扩大表面活性剂的种类和来源，还可能大幅度降低碱的使用浓度，甚至不需要外加碱（即表面活性剂/聚合物二元复合驱），大幅度降低复合驱的化学剂成本和技术风险。

此外，碱剂的加入不仅导致化学剂的成本大幅度增加，而且使用的（强）碱剂还会对油层产生严重伤害。例如，对油层岩石的溶蚀会造成油层垮塌、采出液处理困难、体系沉淀、地层以及油管结垢等一系列问题。严重的地层伤害可能导

致整个复合矿场试验失败。此外，由于碱剂的加入，引入了大量的阳离子，溶液的表观黏度大幅度降低。为此，不得不大幅度增加，甚至成倍增加聚合物的用量来提高溶液的黏度，以满足对溶液黏度的要求，从而造成化学剂用量的增加，使成本上升。因此，本书还对抗温、抗盐、抗剪切的新型聚合物——疏水缔合聚合物在复合驱中的应用进行了阐述。

除技术难题外，成本也是一个重要问题。以目前使用的三元复合体系为例，其成本是聚合物驱成本的4~5倍以上。显然，即使三元复合驱在技术上能够过关，其高昂的经济成本也是无法承受的。

因此，可以说三元复合驱因其未解决的技术难题和高成本投入，目前还无法大规模推广应用。

目 录

前言

绪论	1
第 1 章 三次采油方法概论	6
1.1 采油方法回顾	6
1.2 EOR 的分类	7
1.3 主要 EOR 方法驱油机理概述	8
1.3.1 化学驱	8
1.3.2 气体混相驱	11
1.3.3 热力采油	11
1.3.4 微生物采油	11
1.4 提高油田最终采收率的必要性和紧迫性	11
1.4.1 油田储采不平衡的矛盾日益突出, 稳产条件变差	13
1.4.2 油田进入高含水开采后期, 老井产量递减率加大	14
1.4.3 加密调整和外围“三低油田”开发效果变差, 不能弥补老井产量递减	14
1.4.4 外围勘探对象不断变差, 剩余资源越来越少	15
1.5 碱/表面活性剂/聚合物三元复合驱现状	15
1.5.1 三元复合驱可大幅度降低含水	17
1.5.2 复合驱扩大了波及体积, 提高了驱油效率, 采出了水驱无法开采的原油	18
1.5.3 复合驱过程中均出现乳化现象	18
1.5.4 三元复合驱注采能力下降, 注入能力高于聚合物驱, 采出能力低于聚合物驱	19
1.5.5 三元复合驱过程中化学剂不是同时产出, 但对驱油效果影响不大	19
1.5.6 三元复合驱采油速度高于聚合物驱	20
1.5.7 三元复合驱可比水驱提高采收率 20% OOIP 左右	20
1.6 碱/表面活性剂/聚合物三元复合驱存在的问题	20
第 2 章 复合驱油用主要化学剂	22
2.1 表面活性剂及其结构	22
2.1.1 表面活性剂的分类和结构	22
2.1.2 表面活性剂的一般性质	23

2.1.3	表面活性剂的应用性能	25
2.1.4	双子表面活性剂	27
2.2	聚合物及其结构	28
2.2.1	部分水解聚丙烯酰胺的化学结构	28
2.2.2	黄原胶的化学结构	30
2.2.3	疏水缔合聚合物的化学结构及性质	30
第3章	水驱油机理	41
3.1	油层中油水渗流时的力	41
3.1.1	毛管力	41
3.1.2	毛管压力	42
3.1.3	黏滞力	42
3.2	水驱微观驱油机理	43
3.2.1	微观驱油效率	43
3.2.2	孔隙介质中原油的捕集	44
3.2.3	润湿性对圈闭的影响	47
3.2.4	毛管数对采出程度的影响	47
3.2.5	水驱微观驱替机理实验研究	48
3.3	水驱宏观驱油机理	51
3.3.1	波及效率	51
3.3.2	流度比	52
3.3.3	影响水驱采收率的因素	53
第4章	活化残余油	57
4.1	活化残余油的途径	57
4.1.1	开采水驱剩余油的难度	57
4.1.2	开采水驱剩余油的途径	58
4.1.3	油水界面张力对残余油饱和度的影响	59
4.1.4	孔隙半径、油滴长度对于活化残余油滴所需界面张力的影响	69
4.1.5	油层润湿性对于活化残余油滴所需界面张力的影响	70
4.2	降低化学剂用量和浓度后的驱油效果	75
4.2.1	大庆油田三元复合体系配方条件下岩心驱油试验	75
4.2.2	降低碱剂浓度驱油试验	76
4.2.3	无碱条件下, 商业表面活性剂驱油试验	77
4.2.4	无碱条件下, 表面活性剂/疏水缔合聚合物二元复合体系化学剂成本分析	78

第 5 章 碱/表面活性剂/聚合物三元复合体系驱油机理	80
5.1 影响微观驱替机理的各种因素	80
5.1.1 界面张力	80
5.1.2 毛管压力	81
5.1.3 润湿性	81
5.1.4 油层流体黏度	82
5.1.5 流度比	82
5.1.6 毛细管数	82
5.1.7 位数及孔隙孔喉比	83
5.1.8 原生水	83
5.1.9 孔隙壁面的粗糙度	83
5.1.10 分离压力	83
5.1.11 驱替液与被驱替液本身的内部结构	83
5.2 碱/表面活性剂/聚合物三元复合驱的微观驱油机理	84
5.2.1 实验方法	84
5.2.2 复合体系的微观驱油过程及机理	84
5.2.3 复合驱后续水驱驱油特征	91
5.3 复合驱提高驱油效率和波及效率的岩心试验	93
5.3.1 提高驱油效率和波及效率	93
5.3.2 复合驱提高宏观波及效率的岩心试验	94
5.3.3 黏弹效应提高微观驱油效率和微观波及效率的驱替试验	94
第 6 章 碱/表面活性剂/聚合物三元复合体系流变学	96
6.1 聚合物溶液的黏度	96
6.2 聚合物溶液的流变性	98
6.3 聚合物溶液在孔隙介质中的流变性	100
6.3.1 多孔介质模型	101
6.3.2 假塑性流体在多孔介质中的流动	105
6.3.3 多孔介质中黏弹流体的流变性	109
6.3.4 聚合物溶液在多孔介质中流变性的理论解释	114
6.4 聚合物在多孔介质中的运移	119
6.4.1 聚合物在一维岩心模型上的流动方程	119
6.4.2 对流-扩散方程中的非平衡效应	122
6.4.3 聚合物在多孔介质中的扩散作用	123
6.4.4 聚合物在孔隙介质中运移时的不可进/不可及孔隙体积效应	126
6.4.5 平衡吸附和非平衡吸附效应	129

6.4.6 聚合物驱的黏性指进	132
6.4.7 聚合物在多孔介质中运移时的多分散效应	134
6.5 碱/表面活性剂/聚合物三元复合体系的流变学	135
6.5.1 碱浓度对聚合物溶液黏度的影响	135
6.5.2 碱浓度对表面活性剂/聚合物溶液黏度的影响	137
6.5.3 表面活性剂浓度对聚合物溶液黏度的影响	138
6.5.4 碱/表面活性剂/聚合物溶液的黏弹效应	140
第7章 化学剂相互作用	142
7.1 化学剂相互作用对油水界面张力的影响	142
7.1.1 碱水体系与原油的界面张力性质	142
7.1.2 表面活性剂溶液与原油的界面张力性质	148
7.1.3 碱/表面活性剂二元体系与原油的界面张力	151
7.1.4 聚合物对碱/表面活性剂溶液与原油界面张力的影响	153
7.2 化学剂相互作用对溶液黏度的影响	154
7.2.1 碱对聚合物溶液黏度的影响	155
7.2.2 表面活性剂对聚合物溶液黏度的影响	156
7.3 化学剂相互作用对吸附的影响	159
7.3.1 固体表面吸附理论及概述	159
7.3.2 静吸附理论	163
7.3.3 碱/表面活性剂/聚合物复合体系化学剂相互作用对静吸附的影响	165
第8章 化学剂在多孔介质中的滞留	175
8.1 聚合物在多孔介质中的滞留机理	176
8.1.1 聚合物的吸附	176
8.1.2 聚合物的机械捕集	177
8.1.3 聚合物的水动力滞留	179
8.1.4 各种滞留机理的特征	180
8.2 化学剂在多孔介质中滞留量的实验测定	180
8.2.1 根据流出物的浓度分析确定聚合物的滞留量	180
8.2.2 滞留量测定结果的处理	181
8.3 聚合物吸附/滞留实验研究	182
8.3.1 部分水解聚丙烯酰胺和其他柔卷聚合物的吸附	183
8.3.2 黄原胶生物聚合物在多孔介质上的吸附	191
8.3.3 聚合物在矿物表面的吸附	192
8.3.4 聚合物的吸附对两相流动和相对渗透率的影响	194

第9章 化学剂的筛选及驱油体系的室内评价	195
9.1 液-液体系研究.....	195
9.1.1 碱结垢潜力	195
9.1.2 表面活性剂在地层水中的溶解能力.....	196
9.1.3 碱及碱浓度对油水界面张力的影响.....	197
9.1.4 表面活性剂及浓度对油水界面张力的影响	198
9.1.5 碱/表面活性剂体系与原油界面张力性质	199
9.1.6 碱/表面活性剂体系抗稀释性	199
9.1.7 碱/表面活性剂体系与原油的相行为	200
9.1.8 含盐量图的测定与评价	201
9.1.9 长期稳定性评价	202
9.1.10 抗剪切性	205
9.2 液-固相互作用.....	206
9.3 线性岩心驱替实验	208
9.3.1 相对渗透率曲线的测定	208
9.3.2 天然岩心上的驱油效果及化学剂的损耗	209
9.4 聚合物及浓度的确定	211
9.4.1 复合体系的黏度-聚合物浓度曲线	212
9.4.2 聚合物浓度的确定.....	213
9.5 驱油效果评价	216
第10章 三元复合体系对油层的伤害	218
10.1 碱对油层的伤害.....	218
10.1.1 油田储层基本特征	218
10.1.2 碱与储层单矿物静态浸泡实验研究	219
10.1.3 碱 (NaOH) 对油层天然岩心储层的伤害	224
10.1.4 碱/表面活性剂复合体系对油层天然岩心的伤害	225
10.1.5 碱/表面活性剂/聚合物三元复合体系对油层天然岩心的伤害	226
10.1.6 碱对储层伤害的动态评价.....	227
10.2 表面活性剂在地层水中的沉淀.....	227
10.2.1 石油磺酸盐在地层水中的沉淀现象及机理.....	228
10.2.2 石油磺酸盐在地层水中的沉淀对吸附特征的影响	229
10.3 结垢对油层的伤害.....	231
10.3.1 地层水的组成	231
10.3.2 三元复合驱结垢潜在能力分析	231
10.3.3 结垢预测原理	232

第 11 章 复合驱的油层适应性	234
11.1 复合驱合理井网井距	234
11.1.1 合理井网	234
11.1.2 合理井距	236
11.2 油层非均质性	239
11.2.1 油层非均质变异系数对采收率的影响	239
11.2.2 采收率与非均质变异系数和注入量的关系	242
11.3 油层韵律	244
11.3.1 韵律	245
11.3.2 纵向渗透性	247
11.4 注入时机	249
11.4.1 一般水驱开发过程的含水变化规律	249
11.4.2 注入时机对驱油效果的影响	250
11.5 油层厚度	253
第 12 章 注入程序、注入方式、段塞大小及浓度的优化设计	255
12.1 聚合物前置段塞对驱油效果的影响	255
12.2 主段塞对驱油效果的影响	256
12.3 副段塞对驱油效果的影响	258
12.4 后续聚合物保护段塞对驱油效果的影响	260
12.4.1 聚合物后续保护段塞大小对驱油效果的影响	260
12.4.2 梯度式聚合物保护段塞对驱油效果的影响	261
12.5 主段塞聚合物浓度对驱油效果的影响	262
12.6 聚合物与碱/表面活性剂分注对驱油效果的影响	264
12.6.1 将复合体系中的聚合物作为前置调剖段塞	264
12.6.2 将复合体系中的聚合物作为后续保护段塞	265
12.7 牺牲剂对驱油效果的影响	265
12.7.1 牺牲剂作为前置段塞对驱油效果的影响	266
12.7.2 牺牲剂代替等量表面活性剂对驱油效果的影响	267
12.8 不同化学剂段塞组合对驱油效果的影响	268
第 13 章 复合驱数学模型及求解	271
13.1 基本假设	272
13.2 基本数学方程	272
13.2.1 质量守恒方程	273
13.2.2 能量守恒方程	274
13.2.3 压力方程	274

13.3 主要驱油机理的数学描述	275
13.3.1 吸附现象的表征	275
13.3.2 离子交换的表征	276
13.3.3 非相态表面活性剂稀体系驱油机理数学模型	277
13.3.4 碱化学反应平衡过程的数学描述	278
13.4 油藏物性的描述	287
13.4.1 相饱和度	287
13.4.2 密度	287
13.4.3 毛管压力	287
13.4.4 相对渗透率	289
13.4.5 黏度	290
13.4.6 不可及孔隙体积	291
13.5 聚合物表征	291
13.5.1 黏度修正	291
13.5.2 渗透率降低	292
13.6 数值求解方法分析	292
13.6.1 模型解法的选择	292
13.6.2 压力方程的形成及求解	293
13.6.3 计算稳定性与时间步长选择	295
13.7 油藏地质模型的建立	296
13.7.1 建立地质模型的原则	296
13.7.2 地质模型的处理	296
13.7.3 数值模拟步骤及方法	297
13.7.4 水驱历史拟合及水驱最终采出程度的预测	298
13.7.5 三元复合驱的效果预测与跟踪拟合	299
第14章 油藏描述	302
14.1 油气藏地质研究	302
14.1.1 地层对比	302
14.1.2 岩层的叠覆与沉积充填方	304
14.1.3 地层层序的建立	305
14.1.4 油气藏构造研究	305
14.2 沉积相分析	306
14.2.1 沉积环境分类	307
14.2.2 相标志评价	308
14.2.3 相分析方法	309

14.2.4 测井资料在相分析中的应用	309
14.3 储层非均质性研究	311
14.4 储层成岩作用及孔隙结构	314
14.4.1 储集层岩石学研究	314
14.4.2 成岩作用研究	314
14.4.3 孔隙类型和孔隙结构	315
14.5 储量计算	315
14.5.1 容积法	315
14.5.2 动态法	316
第15章 矿场试验研究	318
15.1 油藏描述	318
15.1.1 试验区概况	318
15.1.2 油藏特征	319
15.2 剩余油及剩余油分布	321
15.2.1 水淹厚度小、剩余油饱和度 高	321
15.2.2 油层纵向上呈多段水淹，中强水洗段多位于每个单元的下部	322
15.2.3 油层平面上大面积水淹，但各井点水淹状况差异很大	323
15.3 水驱空白实验及配产配注	324
15.3.1 实验目的	324
15.3.2 水驱空白试验油水井工作制度的确定原则	325
15.3.3 注采速度的确定	325
15.3.4 油水井的配产配注	327
15.3.5 水驱空白试验实施要求	328
15.4 利用水驱井间示踪技术反求地层参数	330
15.4.1 示踪剂的选择	330
15.4.2 示踪剂用量的确定	330
15.4.3 注示踪剂的施工要求	331
15.4.4 示踪剂资料录取要求	331
15.4.5 利用井间示踪剂技术反求地层参数	331
15.5 三元复合驱油配注工艺技术	334
15.5.1 三元复合体系的流动阻力	334
15.5.2 配注流程	334
15.6 方案实施要求及资料录取	336
15.6.1 强制性规定	336
15.6.2 管柱的要求	336

15.6.3 资料录取及要求	336
第 16 章 效果分析与评价	339
16.1 油井动态反映特征	339
16.1.1 油井含水大幅度下降,产油量大幅度上升	340
16.1.2 大幅度节省注水量,提高采油速度	341
16.1.3 扩大波及体积、改善油层的动用状况	341
16.2 注入井的动态反映特征	343
16.3 生产动态反映特点	345
16.3.1 生产井流压下降、产液能力下降	345
16.3.2 能明显地形成油墙,见效时间早于化学剂的突破时间	345
16.4 数值模拟的跟踪拟合及效果评价	347
16.4.1 主要参数	347
16.4.2 效果预测及跟踪拟合	348
16.5 采收率评价方法	350
16.5.1 直接计算法	350
16.5.2 以实际油水井控制的地质储量为基础的采收率	350
第 17 章 色谱分离及乳化作用对驱油效果的影响	353
17.1 碱/表面活性剂/聚合物三元复合体系的色谱分离机理	353
17.1.1 竞争吸附	354
17.1.2 离子交换	354
17.1.3 液-液分配	355
17.1.4 多路径运移	355
17.1.5 滞留损失	356
17.2 三元复合体系色谱分离评价方法	357
17.2.1 实验原理	357
17.2.2 色谱分离程度描述参数	357
17.3 色谱分离的实验研究	358
17.3.1 填砂管模型上的色谱分离	358
17.3.2 天然岩心上的色谱分离	362
17.4 乳化作用对驱油效果的影响	366
17.4.1 油水比对原油乳化液黏度的影响	367
17.4.2 乳状液的流变学性质	368
17.5 乳化对产液指数的影响	368
17.5.1 油井含水对产液指数的影响	368
17.5.2 脱气指数对产液指数的影响	369

17.5.3 乳化对产液能力的影响	369
17.5.4 地下乳化过程	369
17.6 复合驱原油乳化对采收率的影响	370
17.6.1 乳化提高驱油效率	371
17.6.2 乳化作用调整了层间波及效率	371
17.6.3 乳化作用调整了层内波及效率	372
17.6.4 乳状液形成对后续注入段塞黏度的影响	373
17.6.5 乳状液段塞大小对采收率的影响	373
第 18 章 采出液性质及处理	375
18.1 复合驱产出液乳状液类型	375
18.1.1 表面活性剂的乳化作用	375
18.1.2 复合驱产出液乳状液类型	376
18.2 原油乳状液的性质	376
18.2.1 乳状液粒子大小及分布	376
18.2.2 乳状液黏度	377
18.2.3 乳状液液膜强度及影响因素	378
18.3 乳状液的破乳	382
18.3.1 乳状液破乳理论	382
18.3.2 化学剂及浓度对破乳脱水的影响	383
18.4 界面吸附层中破乳剂分子与乳化剂分子相互作用方程	390
18.4.1 破乳剂分子与乳化剂分子在界面吸附层中相互作用方程	390
18.4.2 破乳剂与乳化剂分子相互作用参数的求解	392
18.5 动态法研究破乳剂对原油乳状液的破乳作用	393
18.5.1 实验装置	393
18.5.2 破乳速度及破乳能力	394
参考文献	395

绪 论

在油田开采的历史上,依靠油层自身能量采油的方法曾经历了相当长的时期。在该时期,因为油田未开发或开发时间较短、地层压力高,原来溶解于原油中的天然气膨胀而将原油举升到地面。当溶解气耗尽时,原油便失去流动能力。这种依靠油层自身能量采油的方法称为能量衰竭采油法,采收率一般只能达到 10%~15% OOIP。直到 100 多年以前,从一口生产井的封隔器漏失事故中,人们才发现注水采油这一方法。该次事故起因于上部高压水层的水通过漏失的封隔器进入油层,造成该井停止生产,但周围油井的产油量却明显上升了。由此,人们总结出人工注水采油法,从而结束了仅仅依靠地层原始能量开采原油的古老方法。

人工注水采油法,是在地层原有能量衰竭后,在油层边缘或油层内部,由地面向井内注水、从生产井中采油的一种方法。注水的作用是补充油层的驱油能量。水作为油的排驱剂,将油排走而占据原油原来占据的空间。因此,注水后油层含油饱和度下降、含水饱和度上升。

自从有了人工注水采油后,便将能量衰竭法称为一次采油;注水称为二次采油。在我国,自大庆油田投入开发以来,几乎所有的新油田都在投入开发的同时便进行人工注水,称为先期注水。因此,一次采油和二次采油的界限并不明确。

注水开发的采收率比能量衰竭法高得多,一般在 25%~40% OOIP,个别油田可达 80% OOIP。由于水的来源广、价格便宜、采收率又高,所以美国自 20 世纪 40 年代初便开始采用注水采油方法。50~60 年代,注水开发工程的项目数达到了顶峰。60 年代后期,注水工程的项目数一直在下降。原因是一些注水油田已进入注水开发的后期,油井含水持续上升,产油量不断下降。当油井含水率达到 95%~98% 时,就达到注水开发的经济极限,注水井停止注水、油井停止生产。通常,油井产液量高,达到经济极限的含水率就高;相反,达到经济极限的含水率就低。在我国,水驱开发经济极限的区块综合含水为 98% 或单井含水为 98%。

人工注水固然可以提高采收率,但水驱经济极限后仍然有一半的原油由于地层的非均质性以剩余油的方式残留于地层,如何采出这些二次残余油(也称水驱残余油),是油藏工程师面临并急需解决的问题。随着科学技术的发展和进步,开采二次残余油便成为可能。这些开采技术,主要是通过向油层注入化学剂或气体溶剂,对油层进行第三次开采,称为三次采油(tertiary oil recovery)或强化采油(enhanced oil recovery, EOR)。但是,对于一些特殊油层,不宜进行注水

开发,如稠油、轻质油以及特低渗透率油层,提高这类油藏的采收率,可以通过热采(稠油)或注气[轻质油和(或)特低渗透率油藏]等技术方法。此外,某些注水油藏,从提高采收率的角度考虑,在注水开发的中期即开始进行三次采油技术。因此,现在人们一般采用提高采收率或强化采油的方法来进一步提高水驱后的采出程度。在我国,除玉门油田外,其他油田对于一次采油和二次采油都没有明确的划分界限。因此在我国,油田使用提高采收率这一名词更恰当。在本书中,三次采油是指油藏注水达到经济极限后采用的提高采收率措施或技术与方法。

EOR 技术以美国发展得最快,这与美国对石油需求量大而最近几十年新发现地质储量越来越少有关。即使有新的储量发现,也属于“三低”(低储量、低丰度和低渗透率)油田或油藏,基本没有,甚至完全没有开发价值。为了鼓励和发展 EOR 技术,美国曾采取了一些非常有利的优惠税收政策。特别是在原油价格暴涨的 20 世纪 70 年代,美国能源部对国家研究机构和有关大学给予 EOR 研究的经济支持,对石油公司则实行 EOR 矿场试验的成本分担。这些政策有力地促进了 EOR 技术的发展。但到 1981 年后,上述税收优惠政策中断,新的政策有利于投资少但提高采收率不高的 EOR 工程项目,这就使一些大的石油公司停止了投资大但采收率也高的 EOR 试验,这就是 80 年代后美国 EOR 技术发展缓慢的重要原因。80 年代中期以后,世界原油价格暴跌,美国政府认为可以从中东获得稳定且价格低廉的原油,对 EOR 研究的经济支持减少,EOR 技术的发展受到较大冲击。但在 2000 年前后,世界原油价格又大幅度回升,如大庆原油价格最高达到 70 美元/桶,各国又开始重视和发展 EOR 技术,美国政府又开始投资和支持研究机构、大学和石油公司从事 EOR 技术的研究开发和工程项目。

20 世纪 50~60 年代,苏联各油田处于注水鼎盛时期,其他 EOR 技术几乎没有发展,直到 80 年代,才开始重视发展除注水以外的其他 EOR 技术。相应地,原苏联石油部成立了提高采收率司,从此 EOR 技术有了较大的发展。

我国最早的 EOR 技术研究于新疆克拉玛依油田,1958 年开始研究火烧油层。大庆油田在投入开发时就开展了 EOR 技术的研究,前后研究过的 EOR 项目有 CO_2 非混相驱、 CO_2 混相驱、非混相天然气驱、氮气驱、微生物驱、聚合物水驱、胶束驱、微乳液驱、泡沫复合驱以及最近几年发展起来的碱/表面活性剂/聚合物(ASP)三元复合驱,是我国 EOR 项目研究最多的油田。此外,胜利、辽河、大港、华北、玉门以及克拉玛依等油田都在 20 世纪 80 年代初进行过 EOR 项目的研究。例如,辽河油田蒸气吞吐的室内评价研究以及矿场试验;大港油田进行了聚合物调剖和聚合物驱的室内研究和矿场试验;华北油田进行了注氮气的室内实验;玉门油田进行了微乳液驱的室内研究和矿场试验。特别是大庆油田,目前聚合物驱已经由先导性矿场试验迈入工业性大规模应用的商业阶段,