

PREDICTIVE METHOD FOR ENHANCED-OIL RECOVERY POTENTIALITY

提高原油采收率潜力预测方法

■ 侯 健 著



中国石油大学出版社

提高原油采收率潜力预测方法

侯健 著

要 容 内

本书主要介绍提高原油采收率潜力预测方法。全书共分五章。第一章介绍提高原油采收率的概念、意义、分类及提高采收率技术的发展现状。第二章介绍提高原油采收率潜力的概念、分类及提高采收率潜力的预测方法。第三章介绍提高原油采收率潜力的预测方法。第四章介绍提高原油采收率潜力的预测方法。第五章介绍提高原油采收率潜力的预测方法。

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

提高原油采收率潜力预测方法/侯健著. —东营:中国石油大学出版社, 2007. 9

ISBN 978-7-5636-2473-7

I. 提… II. 侯… III. 采收率(油气开采)—预测—方法 IV. TE357

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 137498 号

内 容 提 要

本书是对提高原油采收率潜力预测方法的系统化、拓宽和深入。在综述提高原油采收率方法的基础上,分别基于分流理论、流线模型和统计理论建立了提高原油采收率潜力方法,同时介绍了预测方法在油田强化采油潜力评价中的应用。

本书可供油田开发工作者使用,也可作为石油大专院校师生的参考用书。

书 名: 提高原油采收率潜力预测方法

作 者: 侯 健

责任编辑: 郜云飞 (电话 0546—8391935)

封面设计: 九天设计

出 版 者: 中国石油大学出版社 (山东 东营, 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: suzhijiaoyu1935@163.com

排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社 (电话 0546—8391809)

开 本: 185×260 印张: 11 字数: 282 千字

版 次: 2007 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1—1500 册

定 价: 38.00 元

前言

石油作为核心能源,是工业经济的命脉,当今世界所有国家几乎都把石油安全置于能源战略的核心位置。中国国民经济的迅速发展对石油能源的需求日益增长,而石油勘探的难度不断增加。中国陆上油田采用常规注水方法开发,仅能采出约占石油地质储量的三分之一。因此,如何进一步提高已开发油田的原油采收率日趋重要。

提高原油采收率方法的定义范围较为广泛,它包括除了利用天然能量和人工注水保持地层能量开采原油之外的其他任何能提高油藏最终采收率的开采方法,国外称之为改进型采油(IOR)方法。IOR方法包括两类方法:改善的二次采油(ASR)方法和强化采油(EOR)方法。强化采油方法又可分为四大类,即化学驱、注气混相驱和非混相驱、热力采油,以及微生物采油。本书所讨论的提高原油采收率潜力预测是针对强化采油方法。

我国提高原油采收率方法具有较大的潜力。由于提高原油采收率方法的机理十分复杂,并具有投资大、成本高、风险大等特点,因此各国对提高采收率方法的潜力分析工作都十分重视。我国已完成两次全国油田范围的提高原油采收率潜力评价工作,对于指导我国提高采收率的发展方向和确保油田乃至集团公司的工作部署及规划更为科学合理发挥了重要的作用,对经济效益的提高产生了积极的影响。由此充分证实了提高原油采收率潜力评价工作的重要性和必要性。

随着油田开发水平的提高,各种提高采收率方法的改善和推广,尤其是近年来一些新方法的出现和应用,必然会引发开展新一轮潜力评价工作的需求。提高原油采收率方法的潜力预测是提高原油采收率潜力分析的基础,也是确保分析结果可靠性的有力保证。

全书共分五章:第一章综述了提高原油采收率方法的驱油机理、油藏筛选标准、技术优势和存在的问题、应用现状及其前景,属于提高原油采收率潜力分析工作所必需的背景知识;第二章介绍了分流理论及其在水驱、聚合物驱、复合驱、 CO_2 混相驱、蒸汽驱等提高原油采收率方法潜力预测中的应用;第三章以流线方法为统一的理论基础,分别建立了聚合物驱、复合驱、 CO_2 混相驱、微生物驱等提高原油采收率潜力预测模型;第四章在统计理论上,探讨了Fisher判别法、自组织方法、改进型BP神经网络、支持向量机等方法在提高原油采收率潜力预测中的应用;第五章进行了化学驱潜力预测软件的研制和化学驱参数的敏感性分析,并以典型油藏单元为例介绍了提高原油采收率潜力预测方法的应用。

本书是在笔者博士论文基础上进一步发展的成果,感谢导师陈月明教授、孙焕泉教授级高工、李振泉教授级高工对论文的悉心指导,同时也感谢王才经教授、乐友喜教授在论文完成过



程中提供的关于统计学习理论方面的技术支持。陈月明教授、姚军教授对全书进行了审阅,并提出了许多宝贵的意见,此外在本书编写过程中得到了研究生杜庆军、徐彬彬、高德波的帮助,在此一并表示感谢。

由于笔者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

侯 健

2007 年 7 月

目 录

第一章 提高原油采收率潜力预测基础	(1)
第一节 提高原油采收率方法概述	(2)
一、原油采收率及其影响因素	(2)
二、提高原油采收率方法及其分类	(4)
三、EOR 方法应用现状及前景	(6)
第二节 改善的二次采油(ASR)方法	(11)
一、油藏描述和剩余油分布预测	(11)
二、井网和层系调整	(12)
三、水平井/复杂结构井开采技术	(12)
四、水动力学方法	(14)
五、堵水调剖	(15)
六、物理法采油	(15)
第三节 化学驱	(16)
一、聚合物驱	(17)
二、碱驱	(18)
三、表面活性剂驱	(19)
四、复合驱	(20)
五、泡沫驱	(22)
六、化学驱油藏筛选标准	(23)
第四节 注气(非)混相驱	(25)
一、二氧化碳驱	(26)
二、氮气(烟道气)驱	(28)
三、烃类气驱	(29)
四、轻质油藏空气驱	(29)
五、注气(非)混相驱油藏筛选标准	(31)
第五节 热力采油	(33)
一、注蒸汽热力采油	(33)
二、火烧油层	(36)
三、热力采油新技术	(39)
第六节 微生物采油	(42)
一、微生物采油机理	(43)
二、油藏筛选标准	(43)



三、技术优势和存在的问题	(45)
第二章 基于分流理论的提高采收率潜力预测方法	(47)
第一节 分流理论及其在水驱中的应用	(48)
第二节 聚合物驱潜力预测解析模型	(50)
一、基本数学模型	(51)
二、计算实例	(56)
第三节 复合驱潜力预测解析模型	(58)
一、基本数学模型	(58)
二、计算实例	(63)
第四节 CO ₂ 混相驱潜力预测解析模型	(64)
一、基本数学模型	(64)
二、计算实例	(68)
第五节 蒸汽驱潜力预测解析模型	(69)
一、基本数学模型	(70)
二、计算实例	(75)
第三章 基于流线模型的提高采收率潜力预测方法	(78)
第一节 复杂边界条件下渗流场流线分布研究	(78)
一、基本方程	(79)
二、求解数学模型的边界元方法	(80)
三、流线生成	(82)
第二节 聚合物驱潜力预测流线模型	(84)
一、基本数学模型	(85)
二、流线方法求解	(86)
三、与解析解对比	(89)
四、算例及分析	(89)
第三节 复合驱潜力预测流线模型	(93)
一、基本数学模型	(94)
二、流线方法求解	(96)
三、模型验证	(97)
第四节 CO ₂ 混相驱潜力预测流线模型	(98)
一、基本数学模型	(99)
二、流线方法求解	(102)
三、算例与讨论	(102)
第五节 微生物驱潜力预测流线模型	(104)
一、基本数学模型	(105)
二、流线方法求解	(108)
三、计算实例	(109)
第四章 基于统计理论的提高采收率潜力预测方法	(111)
第一节 Fisher 判别法在提高采收率潜力预测中的应用	(111)
一、Fisher 判别分析	(112)

二、样本集的生成	(113)
三、应用实例	(114)
第二节 自组织方法在提高采收率潜力预测中的应用	(117)
一、自组织方法	(117)
二、应用实例	(119)
第三节 改进型 BP 神经网络在提高采收率潜力预测中的应用	(122)
一、BP 神经网络	(123)
二、改进的 BP 算法	(126)
三、应用实例	(127)
第四节 支持向量机在提高采收率潜力预测中的应用	(130)
一、统计学习的基本问题	(131)
二、支持向量机	(133)
三、应用实例	(136)
第五节 几种回归方法的比较	(140)
第五章 提高采收率潜力预测方法的应用	(142)
第一节 化学驱潜力预测软件的研制	(142)
一、CFPM-UPC 软件研制	(142)
二、CFPM-UPC 软件检验	(144)
第二节 化学驱参数敏感性分析	(145)
一、基础方案	(145)
二、油藏参数敏感性分析	(148)
三、聚合物参数敏感性分析	(150)
四、注入参数敏感性分析	(152)
第三节 典型单元化学驱潜力预测	(156)
参考文献	(159)



第一章

Chapter One

提高原油采收率潜力预测基础

原油是目前世界能源消费中的主要能量来源(Economides, 等, 2002)。图 1-1 是 2001 年美国能源部能源信息局对未来 20 年左右世界能源利用情况的预测(DOE/EIA, 2001)。2020 年的能源需求量预计将增至 150×10^{15} kcal, 比 2000 年的能源消费量多出 55%。预计原油需求量将以相同的速率增长, 而保持目前相同的能源需求量份额。天然气需求量将有很大幅度的增长, 预计增长率为 70%。总的油气需求量的份额将由 2000 年的 62% 增加至 2020 年的 68% 左右。

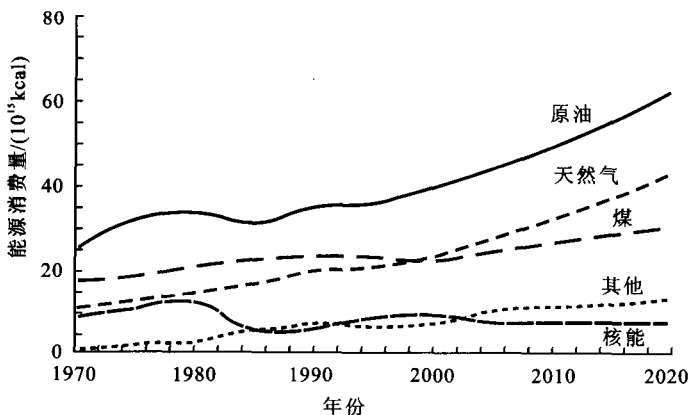


图 1-1 世界能源消费预测

(据 DOE/EIA, 2001)

随着国民经济的增长, 我国对原油的需求也不断增长, 1993 年成为成品油的净进口国, 1996 年又变成原油的净进口国, 目前已成为世界第二大原油消费国和第三大原油进口国。2005 年, 我国的原油消费达到 3.2 亿吨, 对外依存度接近 50%。综合考虑经济增长、城镇化进程加快等各方面因素, 预计 2020 年中国原油消费将达到 5 亿吨左右。以目前中国原油产量的增长速度计算, 2020 年中国原油缺口将达到近 3 亿吨。

国内的石油缺口一直通过国际贸易来补充。当前乃至今后相当长的一段时间, 我国的能源安全将面临油价、油源、通道和政治等四大风险。为了降低石油进口依赖, 除了要转变能源发展战略、节能增效、加强石油替代资源的开发利用外, 还应加强石油资源的勘探开发。“十一五”期间, 我国在实施“稳定东部, 发展西部”战略以来, 原油产量将进入稳定增长期, 年产量将达到 (1.85~1.95) 亿吨。在没有重大探明储量增加的情况下, 采取先进的开采技术提高已开发油田原油采收率, 是原油产量实现稳产上产的重要途径。



第一节 提高原油采收率方法概述

在不同的国家和地区,油田的平均采收率不同(俞启泰,1996)。例如,拉丁美洲和东南亚国家油田采收率为24%~27%,伊朗为17%,美国为33%,前苏联为40%。原油采收率的不同,取决于地质条件和开采方法。前苏联油田平均采收率较高的原因是其油田地质条件较好,并且广泛采用了注水开发方法,前苏联每年约有92%的产量是靠注水方法采出的;美国油田平均采收率偏低的原因是,尽管油田地质条件也较好,但利用注水方法获得的产量占总产量的比重较低,仅约40%。

我国油田平均采收率为32.4%,如果不采用提高原油采收率的方法,将有约三分之二的石油地质储量会留在地下不能被采出。由此可见,通过改善油田开发效果提高原油采收率,具有较大的潜力。

一、原油采收率及其影响因素

油藏的原油采收率定义为油藏累积采出的油量与油藏地质储量比值的百分数。从理论上来说,采收率取决于波及效率和驱油效率两个方面,其表达式为:

$$E_R = E_V \cdot E_D \quad (1-1)$$

式中, E_R 为原油采收率, E_V 为波及效率, E_D 为驱油效率。

1. 波及效率

波及效率 E_V 又称为宏观驱替效率,是指注入流体波及区域的体积与油藏总体积的比值。它是面积波及效率 E_{VA} 与垂向波及效率 E_{VV} 的乘积,即:

$$E_V = E_{VA} \cdot E_{VV} \quad (1-2)$$

影响水驱油波及效率的因素主要包括流度比、油藏非均质性以及井网井距。

(1) 流度比

流度比是指驱替相流度与被驱替相流度的比值。水驱油的流度比定义为:

$$M = \frac{\lambda_w}{\lambda_o} = \frac{K_w/\mu_w}{K_o/\mu_o} = \frac{K_w}{K_o} \cdot \frac{\mu_o}{\mu_w} \quad (1-3)$$

式中, M 为流度比; λ_o 、 λ_w 分别为油、水流度, $\mu\text{m}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$; K_o 、 K_w 分别为油、水相渗透率, μm^2 ; μ_o 、 μ_w 分别为油、水粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

流度比对波及效率的影响很大,随流度比增加,波及效率降低。当驱替相与被驱替相流度比小于1时,定义为有利流度比;反之,当驱替相与被驱替相流度比大于1时,定义为不利流度比。

在注水、注气或注蒸汽时,可以通过增加注入介质的粘度降低驱替相相对渗透率来降低驱油过程中的流度比,提高驱替介质的波及效率。流度控制方法包括调剖、水气交替注入、聚合物驱、泡沫驱等。

(2) 油藏非均质性

油藏存在着平面非均质和垂向非均质,油藏越不均质,水驱油越容易形成平面突进和层间指进,波及效率降低,原油采收率值变小。

油藏的非均质性可用 Dykstra 和 Parsons 定义的渗透率变异系数确定。渗透率变异系数



的变化范围为0~1。渗透率变异系数越大,油藏非均质性越强。

(3) 井网井距

注采井的井网布置方式有很多种,不同的布井方式导致不同的波及效率。同时,在相同的布井方式下,不同的井距也有不同的波及效率。井距越小,波及效率越大,原油采收率值越高。

2. 驱油效率

驱油效率 E_D 又称为微观驱替效率,它是指注入流体波及区域内采出的油量与波及区域内石油储量的比值,通过推导可得如下表达式:

$$E_D = \frac{S_{oi} - S_{or}}{S_{oi}} \quad (1-4)$$

式中, S_{oi} 为原始含油饱和度, S_{or} 为注入流体波及区域内残余油饱和度。

式(1-4)表明,通过降低残余油饱和度可以提高驱油效率,增加原油采收率。降低残余油的途径有降低油水界面张力、改变岩石润湿性等方法。影响驱油效率的主要因素包括毛管数、孔隙结构以及润湿性等。

(1) 毛管数

毛管数 N_c 是影响残余油饱和度的主要因素。毛管数定义为粘滞力与毛管力的比值,其表达式为:

$$N_c = \frac{\mu_d v_d}{\sigma} \quad (1-5)$$

式中, μ_d 为驱替流体的粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; v_d 为驱替流速, m/s ; σ 为驱替相与被驱替相之间的界面张力, mN/m 。

图1-2为典型的残余油饱和度与毛管数关系曲线。可以看出,当毛管数大于临界毛管数时,随着毛管数的增加,残余油饱和度减小。

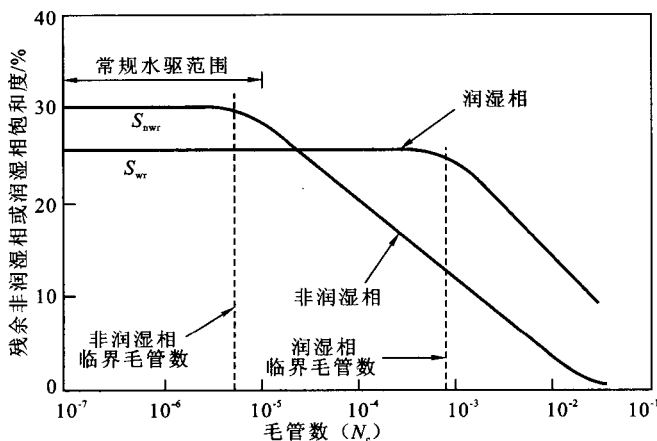


图1-2 典型的残余油饱和度与毛管数关系曲线

由式(1-5)可以看出,增加毛管数,降低残余油饱和度的途径有:① 降低界面张力,这是表面活性剂驱、碱驱或混相驱的主要驱油机理之一。② 增加驱替流速。受注入压力的限制,该方法在矿场应用中有一定限度。③ 增加驱替相粘度,但要使驱替相粘度降低几个数量级相当困难。

(2) 孔隙结构

岩石孔隙结构是复杂的、非均质的,描述孔隙结构的参数包括孔喉大小分布、孔喉比、孔喉

截面形状、孔喉配位数等。一般来讲,构成油层岩石的颗粒越均匀,岩石的微观结构便愈均质,孔隙大小更趋一致,孔喉比小,渗透率大,岩石的驱油效率较高。

(3) 润湿性

地层岩石表面的润湿性可分为水湿、油湿和中性润湿 3 类。岩石表面的润湿性不同,其驱油效率也不同。Donaldson 等(1971)研究表明,对于水湿岩石,水驱油的驱油效率要比油湿岩石大,但也有学者持不同观点。

二、提高原油采收率方法及其分类

提高原油采收率方法的定义范围是比较广泛的,它应该包括除了利用天然能量和人工注水保持地层能量开采原油之外的其他任何能提高油藏最终采收率的开采方法,这与国外的 IOR(Improved Oil Recovery 的缩写,译为改进型采油方法)方法概念较为接近。IOR 方法包括两类(Taber, 等, 1997),即 ASR(Advanced Secondary Recovery)方法和 EOR(Enhanced Oil Recovery)方法,如图 1-3 所示。

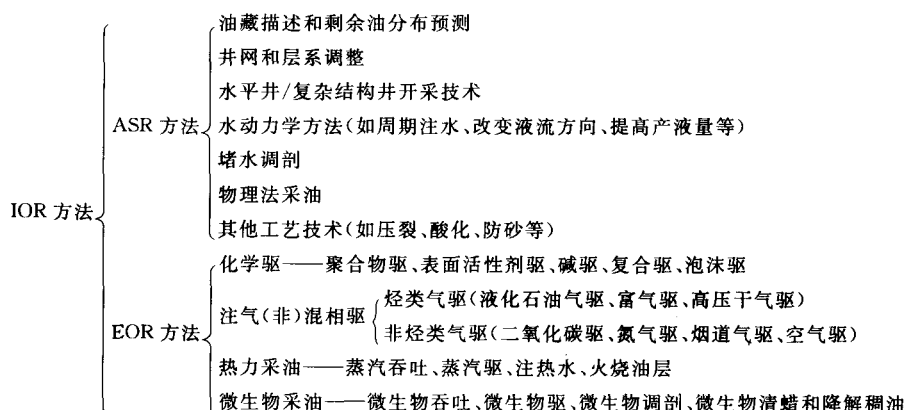


图 1-3 提高原油采收率方法分类示意图

ASR 方法译为改善的二次采油方法。目前常用的 ASR 方法主要包括:油藏描述和剩余油分布预测、井网和层系调整、水平井/复杂结构井开采技术、水动力学方法、堵水调剖、物理法采油以及其他工艺技术。

EOR 方法译为强化采油方法。EOR 方法的一个显著特点是注入的流体改变了油藏岩石和(或)流体的性质,提高了油藏的最终采收率(陈铁龙, 2000)。EOR 方法可分为四大类,即化学驱、注气(非)混相驱、热力采油和微生物采油。其中,化学驱进一步分为聚合物驱、表面活性剂驱、碱驱、复合驱和泡沫驱;注气(非)混相驱可分为二氧化碳驱、氮气驱、烃类气驱、烟道气驱和空气驱;热力采油方法可分为蒸汽吞吐、蒸汽驱、注热水、火烧油层等;微生物采油方法可分为微生物吞吐、微生物驱、微生物调剖、微生物清蜡和降解稠油等方法。本书所研究的提高原油采收率潜力预测方法主要针对各种 EOR 方法。

通常将 EOR 方法称为三次采油方法的说法是不确切的,因为某些 EOR 方法(如聚合物驱、注蒸汽采油等)也用于二次采油,甚至是一次采油阶段。

尽管各种 EOR 方法都能提高原油采收率,但各种方法的采油机理不同,技术优势和存在的问题也不同,详见表 1-1。



表 1-1 不同 EOR 方法采油机理和技术条件对比

EOR 方法		采油机理	技术优势	存在的问题
化学驱	聚合物驱	- 增粘机理 - 降低渗透率机理	技术配套成熟	- 聚合物的稳定性问题 - 驱油与调剖相结合的问题 - 地层伤害问题 - 聚驱后提高原油采收率问题
	碱驱	- 低界面张力机理 - 乳化-携带机理 - 乳化-捕集机理 - 润湿反转机理 - 自发乳化与聚并机理 - 增溶刚性膜机理	- 成本较低 - 工艺比较简单	- 碱耗问题 - 结垢问题 - 乳化问题 - 流度控制问题
	表面活性剂驱	- 低界面张力机理 - 润湿反转机理 - 乳化机理 - 提高表面电荷密度机理 - 聚并形成油带机理 - 增溶机理	洗油效率高	- 表面活性剂的滞留问题 - 乳化问题 - 流度控制问题
	复合驱	化学剂之间的协同效应	- 提高采收率幅度大 - 减少化学剂消耗 - 降低化学驱单位成本	- 色谱分离现象 - 复合驱油机理复杂
	泡沫驱	- 气阻效应 - 改善流度比 - 富油带形成机理	- 较好的流度控制能力 - 自动封堵高渗透部位	- 注入工艺复杂 - 泡沫的形成和稳定难于控制 - 驱油机理复杂
注气(非)混相驱	二氧化碳气驱	- 溶解气驱作用 - 混相驱替作用 - 原油膨胀 - 原油粘度降低 - 岩石渗透率增加	- 混相压力较低 - 对原油组成的要求较低 - 成本较低 - 获得的采收率较高	- 二氧化碳气源 - 流度控制问题 - 腐蚀问题 - 结垢问题 - 沥青质和石蜡的沉淀 - 气体水合物的形成 - 非烃气体的分离和循环注入
	氮气(烟道气)驱	- 混相驱替作用 - 重力驱替作用 - 保持油藏压力	- 适应的油藏类型多 - 提高采收率机理多 - 成本低	- 混相条件较为严格 - 烟道气驱存在腐蚀问题
	烃类气驱	- 混相驱替作用 - 增加原油体积 - 减小原油粘度 - 强化重力泄油	- 高压干气驱成本低,干气可循环注入 - 富气、LPG 段塞驱混相压力较低	- 重力分异产生超覆 - 注气成本问题
	空气驱	- 提高或维持油藏压力 - 烟道气驱机理 - 原油降粘 - 热膨胀效应 - 重力驱替作用	- 适应的油藏类型多 - 可形成烟道气驱 - 来源丰富、廉价	- 生产安全性 - 腐蚀问题



续表 1-1

EOR 方法		采油机理	技术优势	存在的问题
热力采油	蒸汽驱	- 降低原油粘度 - 岩石和流体体积热膨胀 - 蒸汽蒸馏和溶剂抽提作用 - 提高地层压力 - 消除井壁污染	- 工艺相对简单 - 易于控制	- 蒸汽超覆和提前突破 - 热效率问题 - 地层伤害问题 - 蒸汽发生器的环境污染、结垢以及热效率不高等问题
	火烧油层	- 原油的热裂解 - 热驱作用 - 冷凝蒸汽驱作用 - 烃类混相驱作用 - 气驱作用	- 适用范围广泛 - 能使原油改质 - 不受井网、井距限制 - 热利用率高 - 不需水处理设施和隔热措施投资 - 井筒工艺条件简单	- 技术水平要求高,施工困难 - 火烧油层过程中的生产井问题 - 环境污染问题 - 井口安全生产问题
微生物采油		- 封堵大孔道 - 改善孔道壁面的润湿性 - 降解、粘附、乳化原油 - 提高油层压力,增加地层能量 - 使原油膨胀降粘 - 增加岩石渗透率和孔隙度 - 降低水相渗透率,增加油相渗透率 - 降低油水界面张力	- 成本低,见效周期长 - 所需设备简单 - 可用于各种类型的原油 - 不损害地层 - 可在同一油井中多次应用	- 油藏条件的限制 - 菌种的选择问题 - 油层堵塞问题 - 对人体及环境的不利影响 - 基础理论研究尚不完善

三、EOR 方法应用现状及前景

提高采收率方法的应用不仅要与油藏地质特点、物料来源相适应,而且要受到油价、经济形势和国家政策(包括税率)等因素的影响(Brashear, 等, 1994; Farouq Ali, 等, 1996; Cope, 2003)。

1. 国外 EOR 技术现状

据《Oil & Gas Journal》(Moritis, 2000)资料,在 2000 年初,全世界来自 EOR 方法和重油项目的石油产量大约为 $38.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,这个数量相当于世界石油产量的 3.5%。美国 EOR 产量为 $11.89 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,占美国石油年产量的 12%。其余的来自于 EOR 方法和重油项目石油产量的情况分别是:委内瑞拉为 $7.95 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,加拿大为 $6.36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,中国为 $4.45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,印度尼西亚为 $4.77 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其他国家共 $3.18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

美国提高原油采收率方法项目数自 1986 年以来稳定下降,而 EOR 产量在 1992 年时达到最高,目前在保持基本稳定的基础上略有下降(图 1-4),反映出 EOR 项目效益的滞后性。

美国历年不同 EOR 方法产量构成(图 1-5)表明,热力采油和注气(非)混相驱方法是主要的 EOR 方法(Moritis, 2000, 2004, 2006; Felber, 2004)。20 世纪 80 年代,美国 EOR 产量中约 80% 来自热力采油方法(主要是注蒸汽热力采油和火烧油层)。随着注气(非)混相驱(主要包括二氧化碳驱、烃类气驱和氮气驱)项目获得的产量增加,热力采油产量占 EOR 总产量的比例逐渐下降。在 2006 年,美国气驱产量甚至超过热力采油产量。

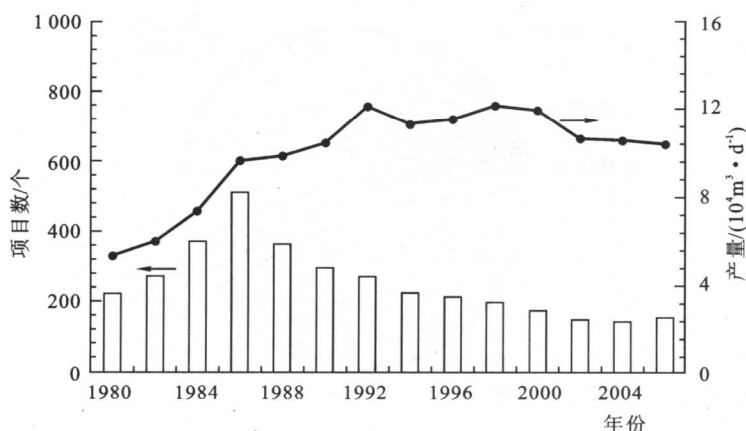


图 1-4 美国历年 EOR 原油产量和项目数

(据 Moritis, 2006)

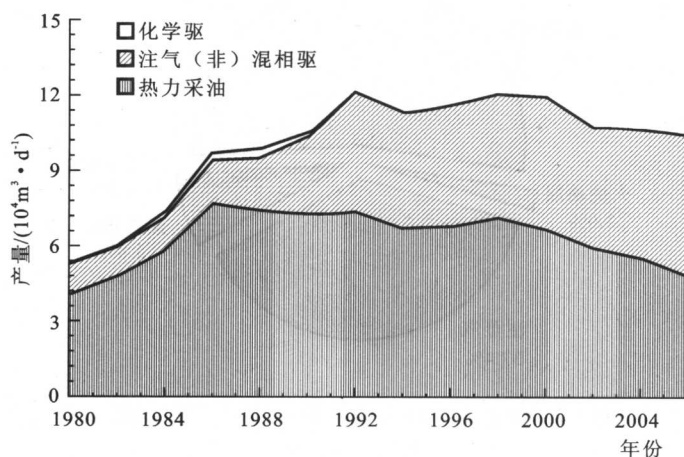


图 1-5 美国历年不同 EOR 方法产量构成

(据 Moritis, 2006)

美国气驱产量的提高主要来自二氧化碳混相驱项目的稳定增加。一方面是由于美国有十分丰富的天然二氧化碳气源,并且已经修建好了连接二氧化碳产地和用地的主干输送管道;另一方面,二氧化碳驱的技术得到很快的发展,其成本大幅下降,一些较小的项目也有利可图,从而促进了二氧化碳驱的发展。随着二氧化碳价格的下降,二氧化碳注入量有所增加,提高采收率的幅度增大。二氧化碳驱的项目一般可提高采收率 8%~15%,生产寿命 15~20 年。

化学驱在美国自 1986 年以来一直呈下降趋势,目前基本处于停滞状态,但应用聚合物调剖仍有很大的发展。美国已把调剖和聚合物驱、钻加密井、水平井等列为改进的二次采油(ASR)方法。特别是深度调剖,在一定条件下它可以代替聚合物驱,或与聚合物驱结合,使聚合物驱获得更大的成效。与聚合物驱相比,深度调剖具有化学剂用量较少、投资回收较快等特点。

图 1-6 和图 1-7 表明,加拿大主要的 EOR 方法也是热力采油和注气(非)混相驱方法(Moritis, 1994, 2006)。有所不同的是,在注气提高采收率产量构成中,美国是以二氧化碳驱为主,而加拿大则是以烃类气驱为主。

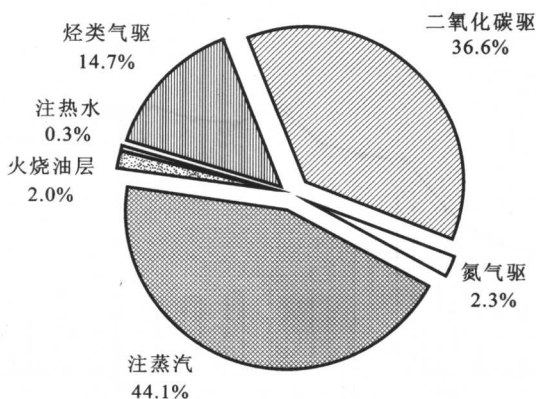


图 1-6 美国 2006 年不同 EOR 方法产量比例构成
(据 Moritis, 2006)

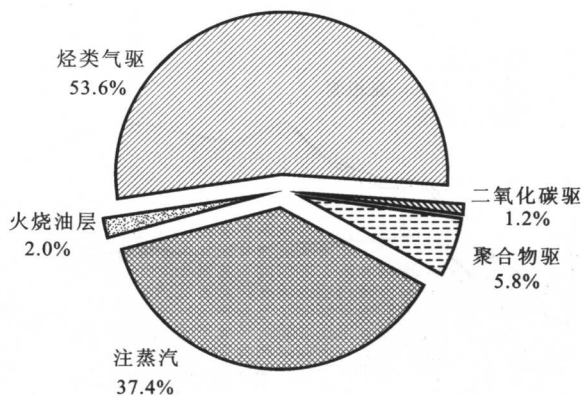


图 1-7 加拿大 1994 年不同 EOR 方法产量比例构成
(据 Moritis, 1994)

前苏联提高采收率以化学方法为主,但其与通常的化学驱的概念有所不同。前苏联广泛应用的提高原油采收率的化学方法主要包括注聚合物、注表面活性剂、注碱液、注硫酸、复合驱油、近井地带的激励处理等。前苏联将近井地带的激励处理,即油水井增产增注技术,也归入化学方法提高采收率的范畴。1991 年,前苏联依靠提高原油采收率技术的增油量为 $2.78 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (Mamedov, 等, 1992)。其中,约 55% 的增油量是靠化学方法获得的,37% 的增油量是靠热力采油方法获得的,而约 8% 的增油量是应用注气方法得到的。在前苏联和俄罗斯,化学驱规模相对较小。由于缺乏天然二氧化碳气源,气驱所占比重很小。

国外微生物驱油技术近 10 年来发展迅速,西方国家以发展各种培养基液的微生物驱油技术为主,俄罗斯则主要发展以油层本源菌为主的微生物驱油技术。他们在菌种筛选、激活、繁殖及代谢物在油层驱油中的作用做过深入研究,开展了现场先导性试验,取得了较好的增油效果。但是由于微生物驱油机理复杂,尚未投入工业化应用 (Bryant, 等, 1996)。

2. 我国 EOR 技术现状

我国油田主要分布在陆相沉积盆地,以河流-三角洲沉积体系为主。受气候和河流频繁摆动的影响,储油层砂体纵横向分布和物性变化均比海相沉积复杂,泥质含量高,泥砂交错分布,油藏非均质性远高于主要为海相沉积的国外油田。同时,陆相盆地生油母质为陆生生物,原油



含蜡高、粘度高。这种陆相沉积环境和生油条件,加大了油田开发难度。采用常规水驱开采,平均采收率只有 32% 左右,这就意味着我国近亿吨探明石油地质储量采不出来。反过来,它为开展三次采油提供了巨大的资源条件(Han, 等, 1989; 闵秦麟, 1998)。

通过国家几个五年计划的重点项目攻关,我国 EOR 技术有了飞速的发展。尤其是我国在注水开发油田提高采收率方法方面进行的潜力分析,使今后我国提高采收率的发展方向更加明确了。经过石油系统各单位,以及科学院、高等院校的共同努力,不同的 EOR 方法都有了长足的进步。

(1) 聚合物驱油已形成较为完整的配套技术,矿场试验获得全面成功,已开始大规模工业化推广应用。

我国油田大多数属于陆相沉积地层,油层非均质性比较严重,渗透率变异系数大多在 0.65 以上,而且原油粘度较高。因此,聚合物驱是我国近年来提高采收率研究的主攻方向。

我国聚合物驱已经历了先导试验阶段、工业性试验阶段,最终发展到大规模推广应用的阶段,矿场实施规模世界第一(Chang, 等, 2006),正逐步发展成为一种较为成熟的提高采收率技术。截至 2006 年,大庆油田已投入聚合物驱工业化区块 35 个,面积 314 km^2 ,动用地质储量 $5.19 \times 10^8 \text{ t}$ 。聚合物驱年原油产量占大庆油田年原油总产量的 27%,累积增油 $5\,500 \times 10^4 \text{ t}$ 。胜利油田已实施聚合物驱项目 23 个,动用地质储量 $2.79 \times 10^8 \text{ t}$,累积增油超过 $1\,000 \times 10^4 \text{ t}$ 。

针对聚合物驱存在的问题,需进一步改善聚合物驱工业化应用技术,解决耐温、抗盐聚合物的研发及生产技术,进一步研究扩大聚合物驱波及体积和降低聚合物驱开采成本,以及探索聚合物驱后进一步提高原油采收率的技术途径。

(2) 复合驱油技术获得重大突破,先导性试验获得成功。

通过科技攻关,我国在复合驱油机理、数值模拟等方面取得了重大突破,有些成果已达到国际先进水平。在矿场注入体系研制、矿场试验方案设计及动态监测、地面注入工艺等方面都取得很大进展,表面活性剂国产化的工作也取得较大的突破。目前已在 大庆、胜利、新疆、辽河等油田开展了三元复合驱小井距先导性试验和正常井距的工业性试验,都取得了令人满意的效果,可提高采收率 15%~20%。

复合驱工业化的关键在于减少表面活性剂用量,降低成本。应加快高效廉价化学驱油剂的研制和国产化进程,优化低碱、弱碱配方驱油体系,形成有商业推广前景的三元复合驱配套技术。

(3) 注气混相驱和非混相驱仍处于试验探索阶段,与国外相比有较大差距。

由于我国东部地区原油粘度比较高,地质储量中绝大部分原油粘度在 $5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 以上,很难达到混相,并且由于二氧化碳天然资源贫乏,东部天然气供不应求,注气混相驱工作进展缓慢。我国大庆、华北、江苏、吐哈等油田先后开展了注气(非)混相驱的室内研究和矿场先导试验,但是总的来讲,我国混相驱研究水平与国外相比还有很大差距,需进一步加快二氧化碳天然资源的勘探,使注气混相驱和非混相驱技术有较快的发展,并力争成为一种可行的提高采收率方法(李士伦, 等, 2000, 2002)。

(4) 热力采油方法在我国石油生产中占有一定的比重。

我国稠油油田大体分布于三个地区:新疆北部的准噶尔盆地西北缘稠油区,包括胜利、辽河油田在内的东部渤海湾盆地稠油区,以及仅开发了河南油田稠油的南部稠油区。在近 20 年的时间里,稠油热力采油取得了较大的发展,工业化生产技术日益成熟。蒸汽吞吐技术已初步实现了配套和完善,是国内热力采油的主要方式。我国在蒸汽驱技术方面进行了大规模的工