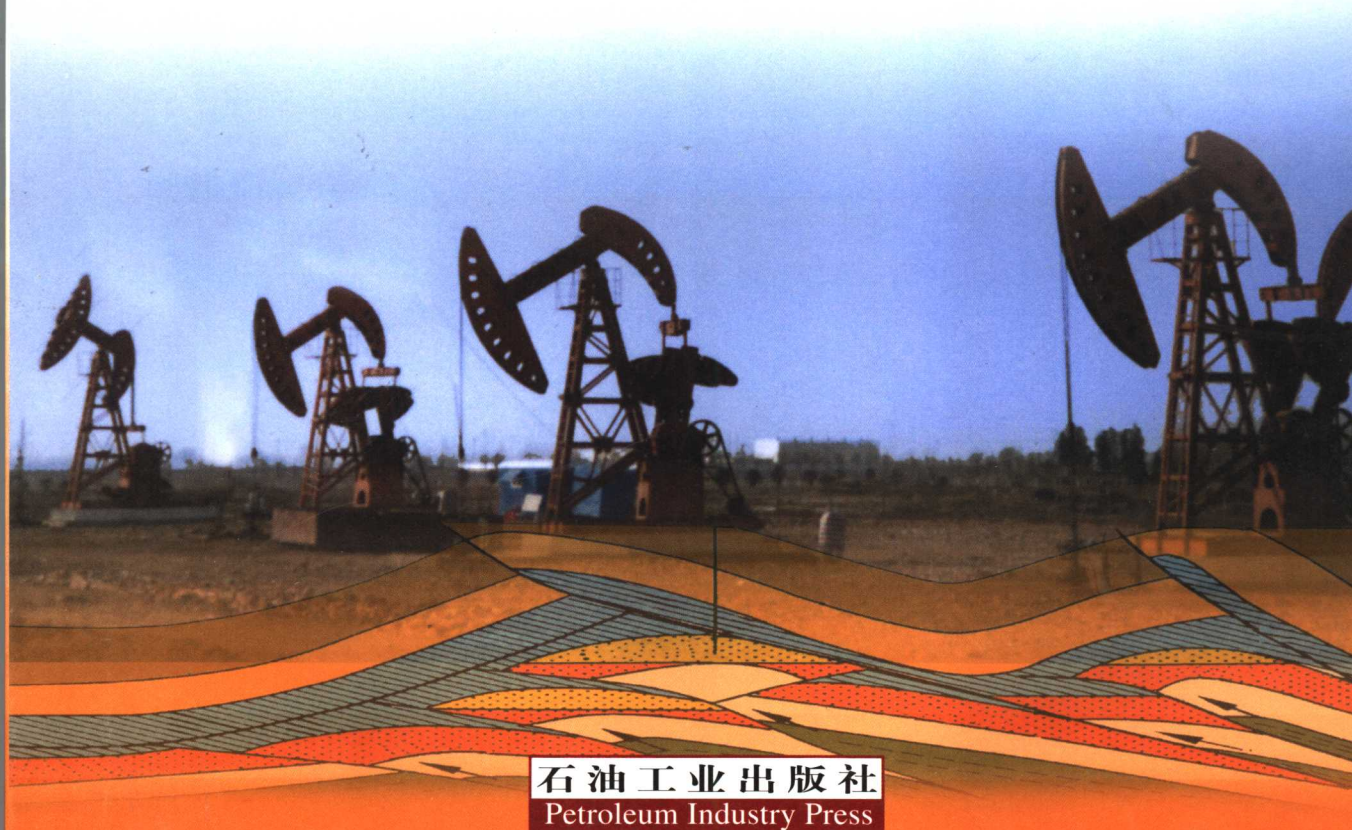




高等院校石油天然气类规划教材

提高石油采收率基础

岳湘安 王尤富 王克亮 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等院校石油天然气类规划教材

提高石油采收率基础

岳湘安 王尤富 王克亮 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书由提高石油采收率应用基础和应用技术两部分组成。在应用基础部分,系统地论述了石油开采过程中油层的物理和化学性质、采油物理化学与流变学基础、驱油基本原理;在应用技术部分,介绍了化学驱、气驱、热力采油和微生物采油等主要提高采收率技术的特点、适应条件、相关工程和工艺问题以及技术前沿的发展动态。

本书是为石油工程及相关专业本科生编写的教材,并且可以作为研究生的教学参考书,供油气田开发领域的科研和技术人员学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

提高石油采收率基础/岳湘安,王尤富,王克亮编著.

北京:石油工业出版社,2007.8

高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 978-7-5021-6001-2

I. 提…

II. ①岳…②王…③王…

III. 采收率(油气开采)—高等学校—教材

IV. TE357

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 099464 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:15.25

字数:387 千字 印数:1—3000 册

定价:22.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

当前,我国石油供求矛盾日益突出,油田开发面临日趋严峻的挑战,对于提高石油采收率技术的需求越来越迫切,对于提高石油采收率技术人才的需求也越来越迫切。因而,迫切需要一部适合于本科生教学的提高石油采收率基础教科书。

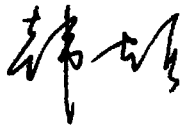
提高石油采收率是一门综合性很强的工程科学。它的综合性表现为两方面:一是学科领域的高度综合——在该领域中,开发地质、油气田开发、物理化学、渗流力学、流变学、材料科学等学科专业互融互渗,形成了一个密不可分的综合性科学体系。这种学科的交叉、互渗,有助于产生新的理论突破,并孕育着新的学科生长点。二是技术的高度集成——提高采收率不是一个单项技术,而是一套集成技术,包含注入、驱替、采出、地面处理等工艺技术;而且,针对一些特殊油藏条件的复合驱油技术也体现了技术或技术原理的集成。可以认为,提高采收率的理论与技术的发展也必将促进相关学科的发展,为这些学科提供新的发展空间。

但是,对于一个高度综合、高速发展的学科领域,要构建一门完整的课程体系,具有相当的难度。如何将提高石油采收率所涉及的众多基础理论有机、合理地融为一体,而不是这些相关学科理论的简单拼接;如何将众多提高采收率技术融于一个共同的理论体系,而不是各种技术的罗列;如何与其他相关课程在内容及深度上有机地衔接,而不是简单地重复——所有这些,都是提高石油采收率课程设计和教材编写必须面对和解决的难点。岳湘安等编著的这部教材为解决这些难点进行了很有成效的探索,这也是这部教材的突出特点。另外,作者在教材中还融合了相当多的国内外提高采收率的最新成果,可以使学生在学习基础知识的同时较快地了解相关领域的前沿进展。

认真阅读这部教材,会明显地感受到作者所付出的心血。教材以驱替残余油和剩余油为目标,以提高采收率共同的基础理论为主线,将各种提高采收率技术构建在一个比较完整的科学体系内,避免了各种技术中相同内容的简单重复。

我衷心地祝贺这部教材付梓出版,并很高兴为其作序。相信这部教材的出版将能够对我国提高石油采收率教学与科研的发展起到重要的促进作用。

中国工程院院士 韩大匡



2007 年春节

前 言

目前,以提高采收率为目的的各种强化采油技术已经逐渐成为我国油田开发的主导技术。当代石油科学技术发展的新形势对石油工程技术人员知识结构也提出了新的要求——必须掌握提高石油采收率的基础知识,并具备应用这些知识解决提高石油采收率问题的能力。本教材正是为适应当代石油科技发展对油气田开发人才培养的要求而编写的。

在本教材的编写中,作者努力汲取国内外相关教科书的精华,融入提高石油采收率前沿的新理论和新成果,汇集作者多年来在提高采收率教学中的积累。作为一部大学本科生教材,本书特别注重基础理论的系统性与完整性,试图在地质学、油藏工程、流体力学、渗流力学、化学、物理化学、热力学等多学科交叉点上构建系统的提高石油采收率理论基础,将各类复杂的、且迅速发展的提高采收率技术置于一个清晰的理论框架中,便于学生在课程学习过程中尽快地从总体上,而不是局限于某个具体的技术,掌握提高石油采收率的基础知识和技术原理,为今后从事提高石油采收率研究和工程技术工作奠定基础。

本教材由提高石油采收率基础理论和应用技术两部分组成。第一章至第四章为基础理论部分,包括基本概念、油层物理化学性质、采油物理化学和流变性原理、驱油基本原理等内容。第五章至第八章为应用技术部分,包括化学驱油技术、气体驱油技术、热力采油技术、微生物采油技术等内容。

本教材是在作者为石油高校本科生开设的“提高采收率基础”课程讲稿基础上编写而成的,由岳湘安、王尤富和王克亮编著。第一、二、三、四、五章由岳湘安编写,第六章由王克亮编写,第七章由岳湘安和王尤富编写,第八章由王尤富编写。

本教材参考了大量国内外相关教材、专著和文献,我们对其作者为提高采收率研究与教学所作出的贡献表示深深的敬意,感谢他们创造性的工作为本教材编写奠定了坚实的基础。侯吉瑞、赵仁保、赵凤兰、张立娟等在资料收集和整理方面做了许多工作,作者对此深表谢意。另外,还要感谢作者的研究生们在文字和图表处理方面所作的大量工作。

由于作者水平和学识所限,书中难免存在不足和错误,敬请广大师生和读者批评指正。

作 者

2007 年春节于北京

目 录

第一章 绪论	1
第一节 基本概念	1
第二节 提高石油采收率技术分类	4
第三节 我国油田开发状况及提高石油采收率的潜力	5
第四节 提高采收率技术发展概况	7
第二章 油层的物理和化学性质	10
第一节 油层的物理性质	10
第二节 油层的矿物组成及性质	20
第三节 注水开采对油层及其中流体的影响	27
第四节 剩余油及其分布特征	33
第三章 采油物理化学与流变学基础	40
第一节 油层流体的相态特性	40
第二节 油藏中的界面现象	46
第三节 石油开采中的流变学基础	56
第四章 驱油基本原理	67
第一节 微观驱油原理	67
第二节 一维水驱油模型及求解	77
第三节 驱油剂在油层中的波及效率	85
第五章 化学驱油技术	96
第一节 聚合物驱油技术	96
第二节 表面活性剂驱	129
第三节 碱驱	142
第四节 化学复合驱	145
第六章 气体驱油技术	151
第一节 驱油用气体的性质	152
第二节 气体混相驱油	155
第三节 气体非混相驱油	163
第四节 气体驱油的适应性	171

第七章 热力采油技术	175
第一节 储层及储层中流体的热力学性质.....	175
第二节 采油热力学基础.....	179
第三节 蒸汽吞吐.....	191
第四节 蒸汽驱.....	196
第五节 火烧油层.....	203
第八章 微生物采油技术	209
第一节 石油微生物基础.....	209
第二节 微生物采油原理及影响因素.....	215
第三节 微生物采油的主要方法.....	221
第四节 微生物采油技术的应用.....	225
参考文献	233

第一章 绪 论

石油是一类埋藏于地层深部的流体矿藏，具有独特的开采方式。与其他矿物资源相比，石油的采收率较低。例如在非均质油藏中，注水开发的石油采收率（Oil Recovery Efficiency）通常只有 20%~40%。也就是说，水驱开采达到经济极限后，仍有一半以上的石油留在油层中。如何利用先进技术将这些剩余油尽可能多地、经济高效地开采出来，即提高石油的采收率，是所有油田开发必然面临，并具有极大吸引力的问题。

在特定技术和经济条件下，剩余的石油可采储量（ G_r ）与已探明的原始石油地质储量（ G_{ooip} ）、采出油量（ G_p ）以及应用该技术可达到的石油采收率（ E_R ）有如下关系

$$G_r = G_{\text{ooip}} E_R - G_p \quad (1-1)$$

由上式可见，增加石油可采储量的途径有两个：一是补充原始石油地质储量（ G_{ooip} ），二是提高石油采收率（ E_R ）。

通过勘探发现新的油田、新的油藏以及通过油藏的扩边来补充石油地质储量是石油增产和稳产最直接、最有效的途径。但是，由于石油是一种不可再生资源，其总地质储量是一定的，随着勘探程度的提高，新增地质储量的难度将越来越大，潜力越来越小。近年来，我国几个大油田新增地质储量多数都是丰度很低、油层物性很差、开采难度很大的油藏。因此，石油可采储量的补充，将越来越多地依赖于已探明地质储量中采收率的提高。

对于一般油藏，尤其是非均质油藏，依靠注水开采方法只能采出石油地质储量中的一小部分，而且这部分石油的开采速度一般很高。因此，从油田开发的自然规律来看，传统的注水开采只是整个油田开发全过程的一个阶段，而提高石油采收率则是油田开发永恒的主题。同时，依靠先进技术最大限度地提高石油采收率，也是对这类不可再生资源进行有效保护、合理利用，实现社会可持续发展的需要。

第一节 基 本 概 念

一、提高石油采收率的定义

近年来，“提高石油采收率”（Enhanced Oil Recovery——EOR）作为一个术语，在概念上已逐渐趋于完善和统一，并被普遍使用。

早期，人们曾习惯于按照油田开发的不同阶段将石油开采技术分为“一次采油”、“二次采油”和“三次采油”。所谓“一次采油”，就是油田的第一个开采阶段，实质上是利用油层所具有的天然能量，如溶解气、气顶等，将原油采至地面的采油方法。在天然能量枯竭之后，采用人工补充油藏能量的开采方法被称为“二次采油”，一般是指以保持地层压力为主要目的的注水（或注气）采油技术。所谓“三次采油”，即油田的第三个采油阶段，是指注水开发之后的开采阶段，如化学驱、混相驱和热采等。

实际上，按照油田的开采阶段（或时间顺序）来划分采油技术的类别存在着明显的缺

陷,是不科学的。因为许多油田的开采并不是按照完全统一的顺序进行的。例如,对于稠油油藏,由于地下原油粘度很高,既不能利用天然能量开采,也不能依靠常规的注水开采,大多数稠油油藏只有靠热采才能投入开发。那么,对于稠油油藏而言,在“一次采油”技术范畴的开采阶段是不存在的,而且作为“二次采油”范畴的注水开发在技术上和经济上也是不可行的,而热采却是其第一次(也许是最后一次)开采阶段,这与传统的一次采油、二次采油、三次采油概念是不相符的。另外,我国许多油田在开发之初便采用早期注水保持压力进行开采,如果按照早期的概念,作为这些油田第一个开采阶段的水驱却被称为“二次采油”。还可能会有这样的情况,某些油田在利用天然开采之后,从经济和技术角度考虑不适宜采用注水开发,只能采用在早期概念下的“三次采油”方法进行开采。显然,在上述情况下,油田的实际开采阶段与“二次采油”、“三次采油”的概念是矛盾的。对于这一问题,在 Don W. Green 和 G. Paul Willhite 所著的教科书《Enhanced Oil Recovery》中也有专门的论述。

由于上述原因,在近年的国际石油工程文献中已经很少见到使用“三次采油”这一词,而“提高石油采收率”则被广泛接受和采用。为使术语更加科学和规范,本教材中使用“提高石油采收率”这一术语。

石油开采技术可以分为如下三大类:

(1) 利用天然能量采油技术——利用油藏中的天然能量作为驱油动力的一类原油开采方法。用于石油开采的天然能量包括溶解气、气顶、边水和底水、原油和岩石的弹性能、重力等。

(2) 补充能量采油技术——通过注水(或注气)向油藏中补充能量的一类原油开采方法。

(3) 提高石油采收率技术——向油藏中注入驱油剂或调剖剂,改善油藏及油藏流体的物理化学特性、提高宏观波及效率和微观驱油效率的采油方法统称为提高石油采收率技术(或称“强化采油技术”)。在此定义下,提高石油采收率可囊括除了利用天然能量开采和以补充地层能量、保持地层压力为目的的注水(或注气)开采之外的所有采油方法。

若无特殊说明,本书中采用的“驱油剂”一词泛指由地面注入油层用于驱油的所有液体、气体和复合体系。

对于一个特定的油藏,其石油采收率的定义为原油采出量与油藏中原始地质储量之比,即

$$E_R = \frac{N_p}{N_{\text{ooip}}} = \frac{N_{\text{ooip}} - N_{\text{or}}}{N_{\text{ooip}}} \quad (1-2)$$

式中 E_R ——原油采收率, %;

N_p ——采出原油量的地面体积, m^3 ;

N_{ooip} ——原油原始地质储量的地面体积, m^3 ;

N_{or} ——油层剩余油量的地面体积, m^3 。

式(1-2)中的原油原始地质储量和原油产出量的地面体积可分别由下式计算

$$\left. \begin{aligned} N_{\text{ooip}} &= B_o \phi A h S_{\text{oi}} \\ N_p &= B_o \phi A_s h_s (S_{\text{oi}} - S_{\text{or}}) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中 B_o ——地层原油的体积系数, m^3/m^3 ;

ϕ ——油层孔隙度;

A 、 A_s ——分别为油藏面积和驱油剂波及面积, m^2 ;

h 、 h_s ——分别为油藏平均厚度和驱油剂波及厚度, m ;

S_{oi} 、 S_{or} ——分别为原始含油饱和度和残余油饱和度。

将式 (1-3) 代入式 (1-2), 可得采收率的计算公式

$$E_R = \frac{A_s}{A} \frac{h_s}{h} \frac{S_{oi} - S_{or}}{S_{oi}} = E_{VA} \cdot E_{VV} \cdot E_D = E_V \cdot E_D \quad (1-4)$$

$$E_V = E_{VA} \cdot E_{VV} \quad (1-5)$$

$$E_D = \frac{S_{oi} - S_{or}}{S_{oi}} \quad (1-6)$$

式中 E_{VA} ——平面波及系数, $E_{VA} = A_s/A$;
 E_{VV} ——垂向波及系数, $E_{VV} = h_s/h$;
 E_V ——波及效率;
 E_D ——驱油效率。

式 (1-4) 为所有驱替开采方式下计算采收率的公式。显然, 采收率的大小取决于波及效率与驱油效率。

在实施某种采油技术之后, 油藏中的原油可分为两部分: 一部分是驱油剂未波及的区域内所剩下的原油, 即所谓剩余油; 另一部分是驱油剂波及的区域中未被驱出的原油, 通常称其为残余油。波及效率和驱油效率就是分别针对这两部分原油而定义的。

下面我们重点讨论影响波及效率与驱油效率的主要因素, 在分析这些因素的基础上, 引出提高采收率的一些基本原理。

二、驱油效率与波及效率

1. 驱油效率

驱油效率 (E_D) 又称微观驱替效率, 其定义为: 在驱油剂波及的区域内采出油量与波及区域内原油储量之比, 即

$$E_D = \frac{N_{ps}}{N_{os}} = \frac{N_{os} - N_{sr}}{N_{os}} \quad (1-7)$$

式中 N_{os} ——驱油剂波及区域内的原油地质储量, m^3 ;

N_{ps} ——驱油剂波及区域内被驱出的油量, m^3 ;

N_{sr} ——驱油剂波及区域内未被驱出的油量, 即残余油量, m^3 。

将储量和残余油量与含油饱和度之间的关系代入式 (1-7), 即可得到式 (1-6) 所示的驱油效率计算式。由式 (1-6) 可见, 提高驱油效率等价于降低残余油饱和度, 而影响残余油饱和度的主要因素有驱替动力学条件、孔隙结构及润湿性等。

以不同形式残留在油藏孔隙中的原油 (油滴、油膜等) 能否被驱替, 主要取决于作用在残余油上驱动力和阻力的相对大小。不论是水驱、气驱还是化学驱, 只有当驱动力足够大, 孔隙中的残余油才能够被驱动。在油藏孔隙中, 驱替残余油的阻力主要是油—水界面形成的毛管阻力。降低毛管阻力, 即降低驱油剂与原油的界面张力, 是提高微观驱油效率的重要技术思路之一。另外, 驱油剂粘弹性对微观驱油效率的影响也已经成为当前提高采收率领域前沿新的研究热点。

所有的驱油过程实际上都是发生在油藏孔隙中。如果以孔隙为基本单元进行研究, 可以获得许多反映驱油物理化学本质的信息。但是, 实际油藏的孔隙结构十分复杂, 在目前的研究水平下还很难对其作精确的描述。因此, 通常只能采用一个宏观统计平均参数——渗透率 (K), 作为流体在孔隙介质中宏观渗流能力的度量, 而有关孔隙结构对驱油效率的影响还仅

限于定性描述。在微观上，油藏中岩石颗粒的大小、形状是不均匀的，由此造成其孔隙结构（如孔隙大小、孔喉比等）的微观非均质性。这种微观非均质性对于驱油效率影响很大。定性而言，岩石颗粒越均匀，油藏的微观孔隙结构就越均匀，孔隙的大小趋于一致，孔喉比小、渗透率较高，相应的驱油效率也较高。反之亦然。

根据润湿性，岩石可分为水湿、油湿和中性润湿等三类。水湿岩石中的水驱效率要比油湿岩石高。在亲水的岩石孔隙中，孔隙壁面和岩石颗粒表面可以被水润湿，水以水膜的形式存在于岩石孔隙表面，而残余油则主要以油滴的形式存在于大孔隙的中心部位。对于亲油岩石，其亲油性越强，附着于孔隙表面的油膜越难以被驱替；孔隙尺寸越小，其中的残余油滴越不易被驱出。

2. 波及效率

波及效率（ E_v ）定义为驱油剂波及的油藏体积与油藏总体积之比。这里的波及效率也常被称为宏观波及效率。如式（1-5）所示，波及效率为平面波及系数（ E_{vA} ）与垂向波及系数（ E_{vV} ）之积。在所有实际驱油过程中，影响波及效率的主要因素有油藏的垂向和平面非均质性、原油与驱油剂的视粘度和相对渗透率、原油与驱油剂的重力差等等。有关的具体内容将在后续章节中详细讨论。

第二节 提高石油采收率技术分类

如前所述，提高石油采收率技术是一类通过改善油藏及油藏流体物理化学特性，提高宏观与微观驱油效率的采油方法的统称。在此定义下，提高石油采收率技术可囊括那些除了利用天然能量开采和以保持地层压力为目的的注水开采之外的各种采油方法。

石油采收率取决于驱油剂在油藏中的波及效率（Volumetric Sweep Efficiency）和驱油效率（Oil Displacement Efficiency）。因此，所有的提高采收率技术都是以提高波及效率和提高驱油效率为目标。但是，由于驱替方式和驱替介质不同，各种提高采收率技术的机理、适应性都有很大差异。

根据驱替介质和驱替方式，现有的提高采收率技术可分为化学驱、气驱、热力采油、微生物采油等。

一、化学驱

凡是以特定的化学剂或其复合体系作为驱油剂，以改善地层流体的流动特性、改善驱油剂—原油—油藏孔隙之间的界面特性为基本原理的所有采油方法统称为化学驱（Chemical flooding）。常见的化学驱方法有聚合物驱、表面活性剂驱、碱水驱、化学复合驱（如表面活性剂—聚合物二元复合驱、碱—表面活性剂—聚合物三元复合驱）等。

二、气驱

凡是以气体作为主要驱油介质的采油方法统称为气驱（Gas flooding）。根据注入气体与地层原油的相态特性，气驱可分为气体混相驱与气体非混相驱两大类。用作驱油剂的气体通常有 CO_2 、 N_2 、轻烃、烟道气等。

三、热力采油

向油藏内注入热流体或使油层中的原油就地燃烧,形成移动热流降低原油粘度,增加原油流动能力的采油方法统称为热力采油 (Thermal recovery)。这是一类稠油油藏提高采收率最为有效的方法。根据油藏中热量产生的方式,热力采油可分为热流体法、化学热法和物理热法三大类。热流体法是以在地面加热后的流体(如蒸汽、热水等)作为热载体注入油层;化学热法是通过在油层中发生的化学反应产生热量,如火烧油层、液相氧化等;物理热法是利用电、电磁波等物理场加热油层中原油的采油方法,这是一类新的且很有发展前景的稠油开采方法。

四、微生物采油

微生物采油 (Microbial Enhanced Oil Recovery——MEOR) 是利用微生物及其代谢产物作用于油藏及油藏中的原油、改善原油的流动特性和物理化学特性、提高驱油剂的波及体积和微观驱油效率的一类采油方法。

除了上述几类方法外,油层深部调剖和作用于油层深部的物理法(如声波、电场等)采油等也都属于提高采收率技术范畴。

第三节 我国油田开发状况及提高石油采收率的潜力

随着我国国民经济的稳定发展,对石油需求迅速增长。自 1993 年我国成为成品油的净进口国开始,1996 年我国又成为原油的净进口国,原油进口量急剧增加。近几年来,我国石油供求矛盾将日益突出,石油进口量持续提高,这已成为制约我国经济可持续发展和国家能源安全的潜在威胁。从我国石油资源特点及其开采形势来看,提高石油采收率是缓解我国石油供求矛盾的主要途径之一。

一、我国石油资源特点及其开发状况

1. 我国石油资源的基本特点

石油是埋藏于地下的一种以液态和气态为主的复杂烃类化合物,其组成主要是烷烃,也有苯环烃和环烷。石油的组成随油层条件不同而异,一般含碳约 84%,氢 11%~14%,另外含少量氧、氮和硫等。石油是由古地质年代有机物质(主要是单细胞植物,如蓝—绿海藻类;单细胞动物,如有孔虫类)沉积后,经过长期物理、化学变化而生成。

我国目前共发现油田 576 个,其中特大型和大型油田数量占总油田数量的 7.3%,但储量却占总储量的 58%。我国的石油资源大部分储存于陆相河流—三角洲沉积的砂岩油藏中,这类油藏地质条件和地面条件较复杂,储层以陆相白垩系、古近系和新近系为主(82.8%);地层条件复杂的油藏占 44%;低渗透、稠油资源占 42.5%,常规油占 57.50%;埋藏深度在 2000~3500m 之间的石油资源占 56%,埋藏深度在 3500m 以上的深层石油资源占 23.6%。陆上有 35.8%的石油资源分布在高原、黄土塬、山地、沙漠、沼泽和滩海等较恶劣的环境中。

从我国的油藏特点来看,陆相沉积的水体规模小、变化大,层间非均质性严重,同一油藏

内的油层渗透率差异可达数十倍到上千倍。油层天然能量低，边底水不活跃。许多油田的地质构造复杂，断裂发育，断层纵横交错，储集层被切割成破碎的小断块，油水分布十分复杂。

从我国的原油特点来看，由于陆相生油母质中腐殖质较多，生成原油粘度较高。我国油田地下原油粘度低于 $5\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的稀油只有 34%，粘度在 $5\sim 20\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的原油为 44%，粘度在 $20\sim 50\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的高粘度原油为 8%，粘度高于 $50\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的稠油为 14%。另外，陆相生油母质中含有较高的木质素和纤维素，使生成的原油含蜡量和凝固点较高。我国原油含蜡量高于 20% 的约占总储量的 70%，凝固点高于 25°C 的约占总储量的 90%。

综上所述，由于油藏地质条件复杂，原油物性差，我国石油资源的开采难度较大，水驱采收率较低。

2. 我国油气田开发状况

我国的石油年产量从 1978 年超过 $1\times 10^8\text{t}$ 以后，长期持续增长。2003 年原油年产量达到 $1.7\times 10^8\text{t}$ ，位居世界第五位，成为世界产油大国之一。天然气产量近几年呈较快增长趋势，2003 年达到 $341\times 10^8\text{m}^3$ ，位居世界第十八位。

近年来，我国陆上东部油田的原油产量已出现自然递减，西部地区产量持续上升，海上油田产量上升较快，全国原油产量稳中有升。已开发油田大多数进入了高含水和高采出程度的开采阶段。采出程度大于 60% 的油田达 82.4%，含水超过 80% 的特高含水油田达 68.7%。

长期以来，我国十分重视石油开采技术的研究，发展了一系列注水开发的配套技术，使注入水不断扩大波及体积，延长了油田的稳产期。目前，我国的注水开发技术和稳产指标均已达到或超过国外同类油田水驱开发的先进水平。

针对多数油藏非均质性强、储油砂岩层数多等特点，我国多数油田采取分阶段调整、逐步完善注采系统的方法进行开采。在油田开发初期部署基础井网，以较大的井距和较粗的开发层系投入开发；在开发中后期，加密井网，进一步细分开发层系，完善注采系统，提高水驱控制储量，提高水驱采收率。

我国多数油藏受陆相沉积环境的制约，沉积时水体规模有限，砂体规模更是受到限制。由于砂体展布面积有限，即使出现不同砂体的叠加连片分布，其面积也不大。这类油藏天然能量较小，很难出现强天然水驱或气顶驱。为了获得较高的产量和采收率，我国油田普遍采用早期注水补充地层能量的开发方式。

我国油田原油粘度较高，在注水开发过程中油水粘度比较高，指进较严重，原油含水上升较快。因此，注水开发油田在高含水阶段仍是一个重要的开采时期，约有 60% 左右的可采储量要在含水 60% 之后开采出来。基于这一特点，我国许多油田采取了逐步强化开采的方法。采用的强化措施有三种：一是加密注采井网，提高注采井数比；二是利用细分层技术控制油井层间非均质性带来的不利影响，提高差油层的开采速度；三是提高排液量，不断提高剩余可采储量的采油速度。由于采取这些措施，我国大多数油田的原油产量的稳产期可以达到采出可采储量的 50%~60%。

二、提高石油采收率的潜力

如前所述，我国油田大部分属于陆相沉积，与国外海相沉积油田相比，纵向上和平面上非均质性严重，油层物性差，原油物性差（粘度高、含蜡高），水驱采收率偏低。目前，全

国已开发油田的平均采收率为 32.2%，其中陆上东部油田的平均采收率较高，达到 34.9%；而陆上西部油田和近海油田的平均采收率只有 24% 左右，远低于国外海相沉积油田的水驱采收率。如果不考虑大庆喇萨杏油田，东部其他已开发油田的平均采收率也只有 27.6%。这意味着水驱之后我国还有近百亿吨探明地质储量残留在地下，有待利用新的提高采收率技术进行开采。这正是我国提高石油采收率的巨大资源潜力。

在 1987—1990 年和 1996—1999 年间，我国对陆上 17 个油区的 $101.36 \times 10^8 \text{ t}$ 地质储量进行了两次提高采收率潜力评价，占当时已投入开发地质储量 ($139.56 \times 10^8 \text{ t}$) 的 72.6%。通过评价，初步筛选出适合于现有提高采收率技术应用的油藏所覆盖的原油地质储量为 $79.8 \times 10^8 \text{ t}$ 。

从技术适应性角度进行评价，在如表 1-1 所示的六种提高采收率技术中，适合于聚合物驱的地质储量为 $67.5 \times 10^8 \text{ t}$ ，在水驱基础上提高采收率 8.2%，可增加可采储量 $5.53 \times 10^8 \text{ t}$ ，在各提高采收率方法中适应的地质储量占第一位。碱—活性剂—聚合物（ASP）三元复合驱的覆盖地质储量为 58.6%，在水驱基础上提高采收率 17.9%，可增加可采储量 $10.5 \times 10^8 \text{ t}$ ，其潜力最大。而二元复合驱和混相气驱的覆盖储量分别为 $4.81 \times 10^8 \text{ t}$ 和 $8.52 \times 10^8 \text{ t}$ ，在水驱基础上提高采收率 12.7% 和 18.78%，可增加可采储量 $0.61 \times 10^8 \text{ t}$ 和 $1.59 \times 10^8 \text{ t}$ 。

表 1-1 各种提高采收率技术潜力分析

提高采收率方法	覆盖储量, 10^8 t	采收率增值, %	增加可采储量, 10^8 t
聚合物驱	67.50	8.20	5.53
二元复合驱	4.81	12.70	0.61
三元复合驱	58.60	17.90	10.50
混相气驱	8.52	18.70	1.59
非混相气驱	7.53	8.60	0.65
热力采油	5.73	22.20	1.28

注：表中各种提高采收率方法覆盖的储量间有重叠。

从经济效益角度评价，在现有技术条件下当油价高于 15 美元/桶时，聚合物驱在经济上具有应用的可能性；当油价高于 20 美元/桶时，复合驱有应用的可能性。

第四节 提高采收率技术发展概况

提高采收率技术的工业化应用不仅受制于技术本身的发展水平，更受制于油价的高低。据《油气杂志》(Oil & Gas Journal) 2000 年的调查，在 1998 年初，全世界提高石油采收率 (EOR) 项目的石油产量大约为 2.3×10^6 桶/天，比 1996 年初的 2.2×10^6 桶/天稍有增长，占全世界石油产量的 3.5%。美国提高采收率的产量中约 60% 为热力采油，另外的 40% 提高采收率产量绝大多数来自注气（轻烃、二氧化碳和氮气）。目前，我国提高采收率的产量绝大部分来自化学驱。

一、国外提高采收率技术概况

1. 美国提高采收率技术发展状况

美国的提高采收率技术研究于 20 世纪初起步，但初期发展较慢。直至 1973 年，由于阿

拉伯国家石油禁运,美国将提高石油采收率作为其能源政策的一部分,并对提高采收率项目给予特殊的优惠政策,使提高采收率的研究与应用得到迅速发展。1986年,提高采收率技术的研究与应用达到高峰,全年共实施512个项目。1986年后,随着油价急剧下跌,提高采收率项目持续减少;而提高采收率产量在1992年调查时居最高,达760907桶/天,以后略有下降。2004年,美国提高采收率的产量为663451桶/天。

美国的提高采收率技术主要是热采。尽管近年来实施的热采项目数有所减少,但自1986年以来其产量却一直保持稳定,占整个提高采收率产量的60%以上。除了热采之外,美国的二氧化碳混相驱项目一直在稳定增加。这一方面是由于美国具有非常丰富的天然二氧化碳气源,并在高油价下已修好了三条输送二氧化碳的管道,可以把二氧化碳从产地直接输送到二氧化碳的用地Texas州;另一方面,二氧化碳驱得到很快的发展,其成本大幅度下降,使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。目前,美国的二氧化碳驱油成本已从1985年的18.20美元/桶降到10.25美元/桶。

美国的化学驱自1986年以来一直呈下降趋势,特别是表面活性剂驱几乎停止。近几年在美国发展较快的是聚合物调剖技术。现在,美国已将调剖和聚合物驱、钻加密井、水平井等列为改进水驱技术,均属于提高采收率技术范畴。特别是调剖技术,已由近井地带的处理向油藏深部发展,由单纯的增产措施发展成为一类提高采收率技术。在一定条件下,深部调剖可以代替聚合物驱,或者与聚合物驱结合,以大幅度地改善聚合物驱的效果。美国现已进行29个胶体分散凝胶(CDG)深度调剖矿场试验,其中19个获得成功。怀俄明州的北Rainbow Ranch开发单元进行了一个成功的胶体分散凝胶注入项目,总共注入11.7%PV,提高采收率至少为8%,其增油费用为2美元/桶。

虽然化学驱的应用在美国已处于停滞状态,但是美国能源部对提高采收率技术的基础研究始终十分重视,有关研究项目的资金有80%由能源部提供。美国在提高采收率技术领域研究主要集中在提高采收率机理、提高采收率新技术、廉价高效驱油剂、微生物采油新技术、重油开采新技术、烃类沉积系统的模拟方法和建立风险评价技术、油气开采对环境的影响及环境保护等方面。

2. 加拿大提高采收率技术发展状况

加拿大的提高采收率技术主要为针对稀油油藏的注烃混相驱和针对稠油油藏的蒸汽驱。例如,1994年气驱中注烃混相驱占项目总数的79%,产量占55%。近几年热采的蒸汽驱技术发展很快。

3. 前苏联提高采收率技术应用状况

前苏联油田有巨大的难采储量,而且水驱后残留在油层中的数千亿桶石油,有着巨大的提高采收率潜力。因此,前苏联非常重视提高采收率技术研究和应用,曾在122个油田的237个区块上实施过提高采收率技术,主要为热力采油、化学驱和气驱。

实施热力采油的地区主要是哈萨克。到1992年为止,热力采油的累计产油量已达 $4080 \times 10^4 \text{t}$,其中蒸汽驱的产量为 $2030 \times 10^4 \text{t}$,注热水的产量为 $1690 \times 10^4 \text{t}$,火烧油层的产量为 $360 \times 10^4 \text{t}$ 。

实施化学驱的地区主要是鞑靼斯坦、西西伯利亚、伏尔加—乌拉尔。到1992年为止,化学驱的累计产油量为 $3920 \times 10^4 \text{t}$,其中主要是聚合物驱的产量。除了聚合物驱之外,前苏联也做过一些活性剂驱的矿场试验,但由于设备陈旧、管理不善、活性剂成本高,大多数试

验的经济效益不好。

到 1992 年底，前苏联主要在西西伯利亚采用天然气和水汽交替注入，累计采油量约为 $670 \times 10^4 \text{t}$ 。

前苏联在提高采收率技术的研究中非常注重利用化工厂的废液，并开发了许多简单易行的增产增注办法，如注粘土胶、纸浆废液等采油方法。另外，物理采油方法在前苏联也是一个十分活跃的研究领域。

二、我国提高采收率技术发展状况

国民经济高速发展对石油的迫切需求和油田提高采收率的巨大潜力，推动了我国提高石油采收率技术研究与应用的快速发展。

我国的提高采收率技术研究起始于 20 世纪 60 年代初，其发展高峰是 80 年代初。1979 年，石油工业部将提高采收率（三次采油）列为我国油田开发十大科学技术之一，并开始着手进行提高采收率技术调研，组织国际合作，引进先进技术，就此揭开我国提高采收率技术高速发展的序幕。1982 年，我国在对国外五个主要石油生产国十余种提高采收率技术综合分析的基础上，对 23 个主力油田进行了提高采收率技术粗选。1984 年我国开始与日、美、英、法等国在大庆、大港、玉门等油田进行聚合物驱和表面活性剂驱的技术合作。

由于我国油藏和原油的具体特点，油田混相压力较高，而且我国探明气源不足，不具备广泛实施混相驱的条件，所以选择化学驱作为我国提高采收率技术的主攻方向，并首先以聚合物驱作为重点。在“八五”末期，我国就基本掌握了聚合物驱油技术。

“八五”末期，全国进行聚合物驱油矿场试验达到 19 个，并在 6 个大油区的 25 个油田（区块）开始推广应用，建成 $168 \times 10^4 \text{t/a}$ 的原油生产能力。

“九五”开始，我国已将聚合物驱增产原油列入陆上原油生产计划，到“九五”末期，聚合物驱年增产原油 $700 \times 10^4 \text{t}$ 。目前，我国的聚合物驱规模超过 $1000 \times 10^4 \text{t/a}$ ，成为世界上聚合物驱规模最大、增产效果最好的国家。

我国从“七五”开始进行表面活性剂驱油技术的研究。在此基础上，于“八五”期间开展了复合驱油技术的研究。由于复合驱油技术远比聚合物驱复杂得多，难度更大、风险更大，所以“八五”期间的研究侧重于应用基础，并开展了 5 个不同油区、不同类型复合驱油先导性矿场试验。1993 年，复合驱油技术在胜利油区孤东油田小井距试验区取得成功，在水驱采出程度已达到 54%（属油田枯竭）的条件下，又提高采收率 13.4%，使该试验区的原油总采收率达到 67%。

我国以化学驱油技术为代表的提高采收率技术发展迅速，已成为我国陆上主力油田持续发展的重大战略接替技术。目前，我国不论是在提高采收率技术的研究水平上，还是在提高采收率技术的应用规模、年增产原油量和技术的系统完善配套上，均属国际领先水平。预计到 2010 年我国化学驱年总增油量将占全国陆上油田年产油量的 15% 左右，成为世界上提高采收率技术工业化程度最高的国家。

第二章 油层的物理和化学性质

提高石油采收率技术是一类在特定的油层物理和化学环境下，以油层中的剩余油和残余油为开采对象的强化采油技术。因此，油层及其中流体（原油、水、气）的性质、原油在油层中的存在形式及其分布状态是提高采收率技术研究与应用的基础。本章在《油层物理》课程的基础上，对与提高石油采收率密切相关的油层物理和化学问题进行深入讨论。

第一节 油层的物理性质

一、油层的孔隙结构

1. 油层孔隙结构的基本特征

从研究流体在油层中运移规律的角度来看，孔隙结构主要是指油层基质（岩石）所具有的孔隙和喉道的几何形状、尺度、分布及其连通关系。一般而言，油层的储集空间主要由孔隙决定，而喉道则是流体在油层中渗流能力的主控因素。

油层的孔隙和喉道是由矿物颗粒骨架构成。由于成岩矿物颗粒的大小、形状和接触关系的复杂性，导致油层中孔隙和喉道的结构极其复杂。另外，由于粘土矿物的存在，油层中的一些大孔隙被分割成小孔隙或微孔隙，有些孔隙还可能被粘土堵塞，致使油层中的孔隙结构更加复杂。

表征微观孔隙结构特征的参数有孔喉半径比、配位数、孔隙几何因子、微观均质系数、阈压、孔喉半径相对分选系数、喉道相对分选系数、面孔比、孔隙分布的分形维数等等。下面介绍几种主要的孔隙结构特征及其表征方法。

1) 孔隙尺度及其分布

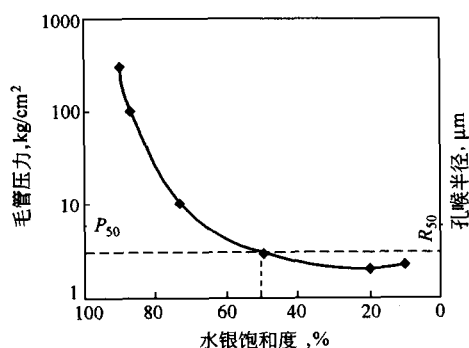


图 2-1 毛管压力曲线示意图

油层中孔隙大小具有随机分布特征，一般用孔隙半径中值 (R_{50}) 来表征油层孔隙尺度的统计平均特性。 R_{50} 为毛管压力曲线（压汞曲线）上水银饱和度 50% 所对应的孔隙半径（图 2-1）。孔隙的尺度分布可用孔隙的分选性和孔隙分布歪度来表征。孔隙的分选性是指孔隙分布的均一程度，孔隙尺度越均匀，则其分选性越好。表征孔隙分选性的参数为孔隙分选系数。孔隙分布的歪度是表征孔隙尺度分布偏于粗孔隙还是偏于细孔隙。偏于粗孔隙的称为粗歪度，偏于细孔隙的称为细歪度。