



石油高等院校特色教材

提高石油采收率原理和方法

主 编 李永太
副主编 刘易非
唐长久

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

石油教材出版基金资助项目

石油高等院校特色教材

提高石油采收率原理和方法

主 编 李永太
副主编 刘易非
唐长久

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是一本以提高石油采收率为主题的教材。全书共分八章,内容包括石油采收率及其影响因素,聚合物驱,调剖和堵水,表面活性剂驱,碱驱、复合驱和泡沫驱,气体混相驱和非混相驱,热力采油和微生物采油。本书可作为石油高校油藏工程、采油工程、油田化学等有关专业的教学用书,也可供科研人员及矿场工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

提高石油采收率原理和方法/李永太主编.
北京:石油工业出版社,2008.9

石油高等院校特色教材

ISBN 978 - 7 - 5021 - 6750 - 9

I. 提…

II. 李…

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(2008)第 132991 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

编辑部:(010)64523546 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:中国石油报社印刷厂

2008 年 9 月第 1 版 2008 年 9 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:15

字数:381 千字

定价:23.00 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

前 言

本书是在西安石油大学石油工程专业使用4年的讲义基础上,逐步完善,并经有关专家评审,确定为石油高等院校特色教材的。

本书在编写过程中,一方面继承了此前同类教材的基本内容,详细阐述了各种提高石油采收率方法的基本原理,并保持了原有教材对各章节文本结构的合理安排。另一方面又考虑到提高石油采收率无论基础研究还是矿场应用都发展很快,同时也是一项实验性和实践性极强的工艺技术,学生不但需要掌握这门工艺技术的基本理论,还需要具备较强的实验室和现场操作技能。因此,本书在阐述各种提高石油采收率方法原理的同时,还安排了较大篇幅介绍各种驱油剂体系的实验室评价方法,包括实验仪器的基本原理和操作规程、驱油剂各项技术参数的测定方法、各种提高采收率实施方案的编写方法、矿场操作规程、提高采收率矿场实施历史和实例、我国提高石油采收率技术现状和存在的主要问题。除了上述内容之外,本书还收录了一些与采油工艺有关的基本概念,并详细讲述了各种采油化学剂(如聚合物、表面活性剂、化学调剖剂等)的作用原理、合成或改性原理及其实验室操作技术。

本书绪论、第一、二、三、五、六章由李永太教授编写;第四章由唐长久教授编写;第七、八章由刘易非教授编写。在编写过程中,油田化学专家孔柏岭教授级高级工程师、马广彦高级工程师在采油工艺实验室研究方法和现场操作技能等方面给予了技术指导,在此一并表示衷心感谢。

由于编者业务水平所限,书中难免有不当和错误之处,恳请使用本书的师生和广大读者批评指正。

编 者

2008年5月

目 录

绪言	(1)
第一节 提高石油采收率的含义	(1)
第二节 提高石油采收率方法分类	(1)
第三节 提高石油采收率方法的历史回顾	(2)
第四节 我国提高石油采收率技术现状	(3)
第五节 提高石油采收率技术发展方向	(4)
第一章 石油采收率及其影响因素	(7)
第一节 油层基本概念	(7)
第二节 残余油形成机理及分布	(21)
第三节 残余油滴移动的条件	(25)
第四节 石油采收率基本概念	(29)
第五节 影响石油采收率的因素	(35)
第二章 聚合物驱	(43)
第一节 聚合物及其性质	(43)
第二节 聚合物溶液	(53)
第三节 聚合物驱油原理和适用条件	(73)
第四节 聚合物驱实验室研究方法	(78)
第五节 聚合物驱油方案编制	(98)
第六节 聚合物驱的矿场实施	(104)
第三章 调剖和堵水	(106)
第一节 调剖堵水机理	(106)
第二节 注水井调剖	(107)
第三节 采油井堵水	(116)
第四节 调剖堵水的矿场实施和发展趋势	(120)
第四章 表面活性剂驱	(124)
第一节 表面活性剂化学	(124)
第二节 表面活性剂驱油法	(129)
第三节 表面活性剂驱实验室研究方法	(148)
第四节 表面活性剂驱的矿场实施	(159)
第五章 碱驱、复合驱和泡沫驱	(161)
第一节 碱驱	(161)

第二节 复合驱	(166)
第三节 泡沫驱	(170)
第六章 气体混相驱和非混相驱	(175)
第一节 混相注入剂	(175)
第二节 烃类气体混相驱	(178)
第三节 非烃类气体混相驱	(180)
第四节 原油最低混相压力和混相驱油藏筛选标准	(183)
第五节 气体混相驱的矿场实施	(185)
第六节 二氧化碳非混相驱	(186)
第七节 气驱存在的问题	(188)
第七章 热力采油	(189)
第一节 稠油特性及开采方法	(189)
第二节 蒸汽吞吐	(198)
第三节 蒸汽驱	(206)
第四节 火烧油层	(213)
第五节 热力采油的矿场实施和进展	(214)
第八章 微生物采油	(217)
第一节 微生物采油概述	(217)
第二节 微生物采油机理	(219)
第三节 微生物采油实验室研究方法	(221)
第四节 微生物采油方法和矿场实施	(224)
参考文献	(231)

绪 言

第一节 提高石油采收率的含义

油田经过钻井、固井和测试之后便进入了开采阶段。在油田开采初期,石油是依靠油藏的天然能量从油层流向采油井的。油藏的天然能量来自地层流体和岩石的膨胀、溶解气压力的驱动、地层流体的重力排驱以及供水地层盐水的侵入等。利用这些天然能量开采石油的方法称为一次采油(primary recovery)。一次采油以不注入任何流体为特征,只需为石油流到地面提供流动通道。

随着石油的不断采出,天然能量不断消耗,不足以维持石油的正常生产,油层中的油便失去流动能力,这时的采收率一般小于 20%。一百多年前,从一口生产井的封隔器漏失事故中,人们才发现向油层注水可以补充地层能量。用人工方式向油藏注水补充油层能量,以增加石油采出量的方法称为二次采油(secondary recovery)。

随着注水时间的延长,油井含水率不断上升。当含水率超过经济极限(95%以上)时,石油的采收率一般只能达到原始地质储量的 30% ~ 50% (少数油层均质、原油黏度低、井网完善、油井密度较高者也可能达到 50% ~ 60%),还有大约 50% ~ 70% 的石油因地质条件、物理和化学作用、开采方式等因素而留在油层中,这时油田开发进入后期。为了进一步提高油藏开发后期的石油产出量,便开始采用向油层注入化学剂或气体溶剂,继续开采剩余在油藏中的石油,这便是三次采油(tertiary recovery)。

但是,对于一些特殊油藏,不宜注水,如稠油、轻质油以及低渗透性油层。提高这类油层的采收率,可以通过热采(稠油)或注气(轻质油或低渗透性油藏)。另外,一些注水油藏,从提高采收率考虑,在注水中期便开始注聚合物溶液,没有明确的二次采油和三次采油之分。因此,现在人们一般采用提高采收率或强化采油这一专有名词,它包括采收率超过一次采油的二次采油和三次采油。从广义上讲,自一次采油结束后所进行的所有提高石油采收率的措施都应归为提高石油采收率(Enhanced Oil Recovery; EOR)过程。

近年来,所使用的改进型采油一词(Improved Oil Recovery; IOR),除包括了 EOR 的全部内容外,还包括了诸如区块周期注水、通过钻加密井或特殊结构井等措施来提高采收率的方法,因此 IOR 的含义比 EOR 更为广泛。

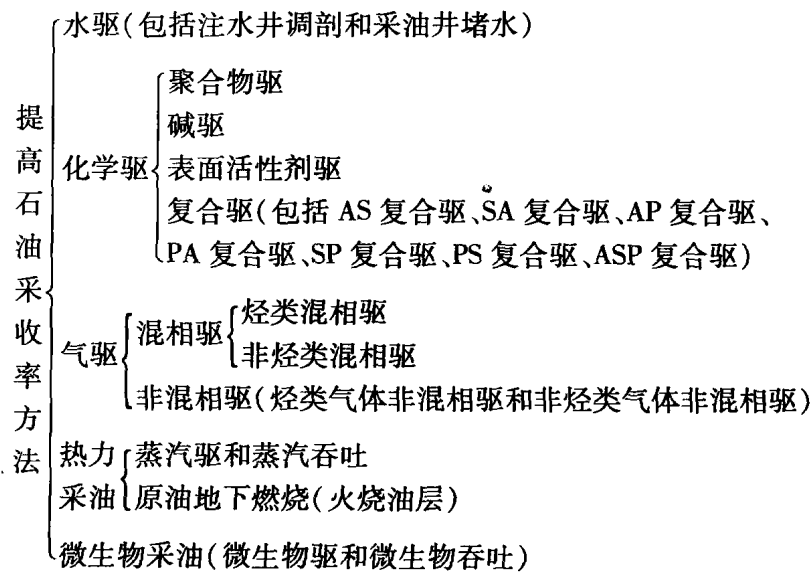
第二节 提高石油采收率方法分类

提高石油采收率方法较多,可以从不同角度进行分类。

一、按驱油剂种类分

按驱油剂种类来分,可以将 EOR 分为化学驱、气体混相驱和非混相驱、热力采油、微生物

采油。其中化学驱又包括聚合物驱、表面活性剂驱、复合驱和碱驱。气体混相驱和非混相驱包括干气驱、富气驱、二氧化碳驱、氮气和烟道气驱。热力采油包括蒸汽驱、蒸汽吞吐、火烧油层（火驱）。微生物采油包括微生物驱和微生物吞吐。



二、按提高石油采收率机理分

按提高石油采收率机理来分,可以将 EOR 方法分为流度控制类、提高洗油效率类、降低原油黏度类和改变原油成分类。其中流度控制类包括聚合物驱、泡沫驱、调整注水地层吸水剖面。提高洗油效率类包括活性水驱、胶束溶液驱、微乳液驱、碱驱、气体混相驱和非混相驱。降低原油黏度类包括热力采油。改变原油成分类包括微生物采油。

第三节 提高石油采收率方法的历史回顾

由表 0-1 可以看到,注水驱油是早在 19 世纪 80 年代就提出来的提高石油采收率方法,加上近几年来采用的注水井调剖和油井堵水等配套方法对注水驱油技术的完善,注水驱油方法已成为成熟度最高和油田生产不可缺少的提高石油采收率方法。化学驱是 20 世纪 10 年代提出的 EOR 方法,至今已经得到工业性应用的化学驱油方法有聚合物驱和复合驱。气体混相驱是 20 世纪 30 年代提出的 EOR 方法,目前 CO₂ 驱、CO₂ 吞吐和烃类混相驱已经得到广泛应用。热力采油也是最早提出的 EOR 方法之一,至今主要发展了注蒸汽采油法,它在稠油开采中已经得到广泛应用。微生物采油提出于 20 世纪 70 年代,目前也已发展成为一项较为成熟的提高采收率方法。

表 0-1 提高石油采收率方法的发展历史

世纪	年代	EOR 方法及其发展历史				
		水驱	化学驱	气体混相驱	热力采油	微生物采油
19	80	提出水驱	—	—	—	—
20	10	水驱矿场试验	提出碱驱	—	提出注蒸汽采油	—
20	20	—	提出表面活性剂驱	—	提出火烧油层	—

续表

世纪	年代	EOR 方法及其发展历史				
		水驱	化学驱	气体混相驱	热力采油	微生物采油
20	30	扩大水驱矿场试验	碱驱矿场试验	提出 CO ₂ 驱	蒸汽驱矿场试验	—
20	40	—	提出聚合物驱	提出 N ₂ 和烃混相驱	火烧油层矿场试验	—
20	50	水驱推广堵水试验	提出泡沫驱 聚合物驱矿场试验	烃混相驱矿场试验	—	—
20	60	注水井调剖 矿场试验	提出微乳驱 泡沫驱矿场试验	CO ₂ 和 N ₂ 气 驱矿场试验	蒸汽吞吐 矿场试验	—
20	70	油水井对应调剖 堵水矿场试验	活性水驱、微 乳驱矿场试验	—	研究湿式火驱和 注蒸汽管线隔热	提出微生物采油
20	80	区块整体调剖 堵水矿场试验	研究各驱油方法组 合及应用条件优化	—	研究注蒸汽中 流度控制技术	微生物采 油矿场试验
20	90	以调堵为主的 区块整体治理	推广聚合物驱 和三元复合驱	推广 CO ₂ 和 烃气混相驱	注蒸汽 开采稠油	微生物采 油技术推广

从历史发展来看,美国的 EOR 技术发展最快,这与美国对石油需求量大,而近几十年来新发现油田的数量越来越少的现状有关。苏联在 20 世纪 60 年代前,注水开发处于有效期,直到 80 年代才开始重视除注水以外的其他 EOR 方法的研究,进入 90 年代的 1991 年,依靠除注水以外的其他各种 EOR 技术日增产原油的量已经达到约 1.8 万桶的水平。

我国提高石油采收率方法研究最早的是新疆克拉玛依油田,1958 年开始研究火烧油层;大庆油田在 20 世纪 60 年代初,一投入开发就开展了提高石油采收率方法的研究,前后研究过 CO₂ 水驱、聚合物溶液驱、CO₂ 混相驱、表面活性剂溶液驱、弱冻胶调驱和微生物驱等,是我国提高石油采收率方法研究最多的油田。除此之外,大港、胜利、华北、河南、辽河、玉门等油田已在 20 世纪的 80 年代初进行了除水驱之外的其他提高石油采收率方法的研究。目前,我国老油田油井已面临含水率不断上升的局面,对它们实施提高石油采收率技术已迫在眉睫。

第四节 我国提高石油采收率技术现状

一、聚合物驱油技术

我国的聚合物驱油技术于 20 世纪 90 年代初在大庆油田和大港油田获得突破,至今已完成了一系列配套技术研究,不但在高渗透率和低含盐油藏取得矿场试验的全面成功并已进入大规模工业应用阶段,而且在中低渗透率和高含盐油藏的矿场试验也获得了阶段性成果。概括起来,我国的聚合物驱油技术所取得的主要成果有:高温聚合物筛选评价技术;提高聚合物溶液稳定性技术;厚油层油藏精细描述技术;聚合物驱方案优化设计技术;厚油层整体远距离调剖技术;驱油剂体系混配和注入工艺技术;聚合物排驱动态调配技术;聚合物分注工艺技术;聚合物对地层伤害防治技术;聚合物驱剩余油监测技术。

二、聚合物弱冻胶强化驱油技术

聚合物弱冻胶强化驱油技术是在聚合物驱的基础上发展起来的一项提高石油采收率新技术,该技术具有驱油和调剖双重作用,使用接近或低于聚合物驱浓度的聚合物溶液,加入少量延缓交联剂使之在油层环境条件下产生缓慢、轻度交联,大幅度提高溶液黏度、阻力系数和残余阻力系数,较大幅度地改善了油藏的非均质状况,对高渗透层起到封堵作用,使后续注入液流改向,扩大了波及体积。由于该体系是延缓交联弱冻胶体系,在注入过程中,会产生像聚合物驱一样的驱油效果,从而起到调剖和驱油的综合作用。与常规聚合物驱相比,聚合物弱冻胶驱油体系不仅有较高的黏度和较好的黏弹性,而且其耐温性、抗盐性、抗剪切及剪切恢复性、对氧及细菌的耐受性都有大幅度提高。在此项研究中,西安石油大学开发了可适应各种地质条件的系列交联剂,将聚合物处理油藏的矿化度范围扩展到 $10 \times 10^4 \text{ mg/L}$,温度范围扩展到 150°C 。目前,在大庆、胜利、河南、辽河和华北任丘等油田均开展了现场先导试验,现场试验结果表明聚合物弱冻胶驱注入压力比聚合物驱上升 2 MPa 以上,且现场注入性良好;在注聚阶段聚合物驱与聚合物弱冻胶驱的开采效果相当,但在后续水驱阶段,聚合物弱冻胶驱效果优于聚合物驱,含水上升速度和产量下降速度都比聚合物驱慢;聚合物弱冻胶驱调整吸水剖面能力比聚合物驱强,且产液能力弱、动液面下降幅度大;聚合物弱冻胶驱可较大幅度地提高采收率和降低成本。1999 年在胜利油田孤岛地区进行的聚合物弱冻胶驱先导试验,平均注入压力从 4.4 MPa 提高到 10.8 MPa ,注水强度由 $1.1 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa})$ 下降到 $0.6 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa})$ 。至 2002 年 1 月,日产油量由 201 t 上升至 325 t ,含水率由 91.3% 下降到 86.3% ,累计增油 $7.04 \times 10^4 \text{ t}$ 。

三、复合驱油技术

将聚合物与表面活性剂、碱或其他化学剂复配成各种复合驱油剂体系,可以大幅度提高单一组分的驱油效果。近年来,我国在复合驱基础理论研究方面取得不少重要成果。继胜利孤岛小井距复合驱先导试验之后,大庆、胜利、辽河和克拉玛依油田也先后成功地进行了多个复合驱先导试验。在此基础上,大庆油田又在杏二区中部开展了三元复合驱扩大试验,试验区提高采收率 20% 以上。孤岛油田三元复合驱扩大试验提高采收率 12% ,试验区油井综合含水率由 94.7% 下降至 84.5% ,日产油量由 82 t 上升至 194 t ,累计增油 $10.42 \times 10^4 \text{ t}$ 。至此,复合驱油技术正式进入工业化应用阶段,并初步形成了一系列配套工艺技术。

第五节 提高石油采收率技术发展方向

一、进一步改善聚合物驱油效果,降低成本,加快新型聚合物的研制工作,扩大聚合物驱应用范围

尽管聚合物驱目前在技术上已基本成熟,具备了在矿场大规模应用的条件,也是将来一段时间提高采收率的主要技术,但是如何进一步改善聚合物驱效果,做好聚合物驱过程中注采调整工作,减少聚合物用量,使聚合物驱的原油生产成本有所下降,是目前迫切需要解决的问题,同时要开发新型耐盐、耐温聚合物,进一步扩大聚合物驱适用范围,解决污水配制和环境保护问题。

二、加快三元复合驱工业化生产的步伐,优化三元复合驱体系配方,尽快研制出高效、廉价的表面活性剂

目前,在大庆油田开展的几项三元复合驱先导试验均取得了提高采收率 20% 的好效果。实践证明,三元复合驱比聚合物驱采收率提高一倍,产量也有较大幅度增加,三元复合驱过程中出现的产液指数下降、乳化、结垢、产出液处理等技术难题正在逐步得到解决,由于三元复合驱提高采收率的幅度大,也非常适合在大庆油田应用,所以三元复合驱是接替聚合物驱,提高采收率的重要技术,当前重点要继续深化三元复合驱机理研究,优化三元复合驱体系配方在确保三元复合驱效果的前提下减少聚合物和碱的用量。研制高效、廉价的国产表面活性剂,从而进一步降低三元复合驱的生产成本,为大规模接替聚合物驱做好技术准备。

三、完善蒸汽驱配套技术,加快中深层稠油油藏蒸汽驱技术攻关,努力扩大稠油蒸汽驱规模

我国在稠油蒸汽驱方面开展工作时间较长,并取得了很大进展。目前蒸汽驱产量也达到了一定规模。已基本掌握浅层稠油蒸汽驱技术,中深层稠油油藏蒸汽驱试验也取得了突破性进展。但在目前蒸汽驱开发中仍存在一些问题,今后应加强油藏剩余油分布规律和油藏精细描述研究,提高井底蒸汽干度及有效提液,增加蒸汽驱动态监测手段,及时进行注采调整,提高油汽比及采收率,进一步扩大稠油油藏蒸汽驱规模。

四、加快注气提高采收率配套技术的研究,争取以较快的速度使其发展成为一种经济有效的提高采收率技术

由于受 CO_2 和天然气资源的限制,我国注气提高采收率技术发展较晚,近年来随着西部地区大量天然气资源的开发和大批低渗透储量的发现,注气提高采收率技术已日益受到重视。目前正在开展吐哈葡北油田注烃混相驱、塔里木油田塔中注烃非混相驱,牙哈富含凝析油凝析气田、塔西南柯克亚和大港大张佗凝析气田注气保持压力矿场试验,并且在大庆、吉林、长庆等地区开展了 CO_2 驱和天然气驱开采低渗油藏先导试验。这些试验将为注气提高采收率技术的发展提供宝贵的经验。当前主要是搞好注气提高采收率配套技术的研究,包括开展注气机理及数模技术、注入工艺、动态监测技术、防窜和提高波及效率及注气室内实验评价技术等研究,为大规模应用注气提高采收率技术做好技术储备。

五、因地制宜开展微生物采油、物理法采油等多种提高采收率方法的研究与推广

我国油藏类型复杂,油田分布广。对于一些断块油田、低产油井、边远井、零散井,常规的提高采收率方法由于其成本较高、技术复杂等原因很难实施,因此,因地制宜地发展一些实用的、低成本的提高采收率方法很有必要,而且需求前景趋旺。微生物采油是近十年来发展较快的一项技术。我国主要油田、有关科研院所及一些高校开展了一系列研究工作,对微生物驱油机理的认识更加深入。在应用方面,吉林、大港、大庆、辽河、新疆等油田均已开展了单井吞吐试验,平均有效率为 60% ~ 70%,平均每口有效处理井每立方米菌液增油 6 ~ 100t。大港油田先后在港西 4 区和港东二区开展了微生物驱矿场试验均取得了很好的效果,目前正在与国外合作开展本源微生物采油试验。总体上看,我国在微生物采油技术应用中,单井吞吐多、整装区块驱替试验少,微生物驱油技术的潜力还没有充分发挥出来。在基础研究方面,目前对地下

发酵方式的微生物机理仍缺乏足够的认识,在适合微生物驱的油藏条件评价、方案优化设计和菌种开发方面仍缺乏依据和技术支持;在微生物采油方面还没有形成整体技术和生产能力。微生物采油技术涉及微生物学、化学和油藏工程学,属于多学科交叉的综合性技术,需要各专业通力协作。针对目前的实际情况,我国已经并正在重点支持对微生物采油的关键理论与技术进行攻关,开展我国油田微生物提高采收率潜力评价,在微生物采油方面形成配套技术和生产能力,以逐步实现微生物采油技术的工业化应用。

第一章 石油采收率及其影响因素

本章首先介绍关于油层、油层物理性质和油层流体渗流的基本概念,然后从水驱油层残余油的形成机理入手,分析注水驱油波及效率低、洗油效率不高的原因。通过对残余油滴受力分析得出使残余油活化、运移的外部条件,进而对提高石油采收率的基本原理有一个全面的理解。

第一节 油层基本概念

一、油层

凡是具有孔隙性和渗透性,油气能在其中流动的岩层称为储集层(储层)。常见的储集层有砾岩层,砂岩层,粉砂岩层,碳酸盐岩层,裂缝性泥岩层,具有次生孔隙、裂缝的变质岩层及岩浆岩层等。储藏有石油的储集层称为储油层(油层);储藏有天然气的储集层称为储气层(气层);不含石油、天然气及其他气体,含水量达到规定标准的含水层称为水层,水层常以边水或底水形式存在。在储油层中,最重要的是砂岩油层,也是提高石油采收率涉及最多的油层。在一定的沉积条件下形成、上下被不渗透层分隔、层内较为均一且具有一定厚度和分布范围的含油(气)砂岩层称为单油层,俗称小层。存在于单油层之间或单油层内部、分布不稳定的不渗透层称为夹层。在同一沉积环境下沉积、分布状况和油层性质相似、互相靠近的一套油层组合称为油层组。油层组的顶部和底部一般都有分布稳定、厚度较大的不渗透层(隔层)分隔。油层中最主要的流体是油、气和水。

二、油层岩石的矿物学成分

虽然矿物学家已经鉴定出 2000 多种矿物,但真正有意义的常见矿物只有 20 余种,其中与石油地质关系密切的矿物则更是为数不多,它们分别是:

(1) 长石:长石是最丰富的矿物类型,约占地壳中岩石物质的 60% 以上。长石都是钠、钾和钙的铝硅酸盐类矿物。

(2) 石英:石英是氧化硅类矿物中唯一常见矿物,在地壳岩石物质中的丰度位居第二。石英的基本成分是 SiO_2 。燧石是 SiO_2 结晶的一种变种。

(3) 云母:云母是带有氢—氧化合物的相当复杂的钾和铝的硅酸盐类矿物,其中包括含有铁和镁的黑云母和不含这两种元素的白云母。

(4) 角闪石和辉石:角闪石和辉石是两族常见的、相互有关的含铁、镁矿物。

(5) 橄榄石:橄榄石是一种含有铁、镁的硅酸盐类矿物。

(6) 方解石:方解石是唯一缺硅的造岩矿物,其化学成分为碳酸钙。

(7) 黏土:黏土是岩石风化产物,出露于地表岩石中的长石和含铁、镁矿物尤其容易受到风化作用。与油田地质关系密切的黏土矿物有高岭石、蒙皂石、伊利石、绿泥石、海泡石、坡缕石等。高岭石、蒙皂石和伊利石的基本结构都是硅氧四面体和铝氧八面体。海泡石和坡缕石的基本结构都是硅氧四面体。黏土矿物的性质与油田注水有密切关系。

1. 带电性

黏土矿物在与水接触的情况下,其颗粒表面会带有电荷。这些电荷的来源有:

(1) 离子交换:黏土矿物颗粒表面都有一定数量的可交换阳离子。当黏土矿物与水接触时,这些可交换阳离子就从黏土颗粒表面解离下来,以扩散方式排列在黏土颗粒周围,形成双电层,使黏土颗粒表面带上负电荷。黏土矿物颗粒表面的带电量可用阳离子交换容量(CEC)表示,它是指 1kg 黏土矿物在 pH 值等于 7 的条件下能够被交换下来的阳离子总量(用一价阳离子物质的量表示)。不同类型的黏土矿物有不同的 CEC 值,表 1-1 为各种黏土矿物的 CEC 值,蒙皂石 CEC 值最大,高岭石 CEC 值最小。

表 1-1 黏土矿物的 CEC

黏土矿物	CEC, mmol/kg	黏土矿物	CEC, mmol/kg
蒙皂石	800 ~ 1500	绿泥石	100 ~ 400
伊利石	200 ~ 4000	坡缕石	100 ~ 200
海泡石	200 ~ 450	高岭石	30 ~ 150

(2) 黏土颗粒表面羟基与酸或碱的反应:当黏土矿物与水接触时,黏土矿物晶体的铝氧八面体和硅氧四面体结构可与水中的 H^+ 和 OH^- 结合,使黏土颗粒表面形成羟基($-OH$)。在酸性条件下,颗粒表面的羟基可与 H^+ 反应,使黏土矿物表面带正电荷;在碱性条件下,黏土矿物表面的羟基可以与 OH^- 反应,使黏土矿物表面带负电荷。

上述两种来源电性的代数和决定了黏土矿物的最后带电性。一般情况下,黏土矿物表面带有负电荷。

2. 吸附性

黏土矿物表面的吸附分物理吸附和化学吸附。物理吸附是指吸附剂与被吸附物质之间通过分子间力或氢键力而产生的吸附。非离子型表面活性剂和非离子型聚合物在黏土表面的吸附就属于物理吸附。化学吸附是指吸附剂与被吸附物质之间通过化学键而产生的吸附。阳离子型表面活性剂和阳离子型聚合物均可通过离子键在带有负电荷的黏土矿物表面产生吸附,它们的吸附就属于化学吸附。

3. 膨胀性

黏土矿物的膨胀性是指吸水后体积增大的特性。黏土矿物的膨胀性与黏土晶体结构有关。高岭石晶层间存在氢键,联结紧密,其中的硅和铝很少为其他离子所取代,属于非膨胀性黏土矿物。蒙皂石晶层间不存在氢键,联结松散,水容易进入其中,可使大量的硅和铝被其他离子取代,并发生体积膨胀,因此属于膨胀性黏土矿物。正是由于这种膨胀特性和晶格取代特性,使得蒙皂石成为膨润土的主要成分,被用于控制石油钻井液的稠度。伊利石的基本结构与蒙皂石相似,但属于非膨胀性黏土矿物。绿泥石类似于伊利石,主要矿物成分为硅、铝、镁、铁等,属于非膨胀性黏土矿物。从油田水分析资料还可以看到,在油田某些地区的地层水中还存在一定量的含钡、锶矿物。

由油田地层的矿物学组成可以看到,地层岩石的基本成分硅、铝、钙、镁、铁、钡、锶为地层水中提供了源源不断的多价阳离子,形成了不同矿化度、不同水型的地层水。地层水的矿化度随地层深度的增大而增大,形成了为数众多的高矿化度油藏,并成为影响化学驱油剂驱油效果和导致油田结垢的主要因素。

另一方面,普遍存在于油藏岩石孔隙中的天然气在漫长的地质年代变迁中,不断与地层岩石中的化学成分发生交换,建立起了压力平衡和温度平衡。在油田开发时,这些平衡遭到破坏,源源不断的二氧化碳就成为油田结垢的重要物质基础。

三、油层岩石的物理性质

1. 岩石的孔隙性

地层岩石的基本成分是由胶结物质(泥质、钙质、硅质、铁质等)黏结在一起的碎屑岩石颗粒,在岩石颗粒之间又充填有数量不等的矿物颗粒(黏土矿物、绿泥石、长石、石英、方解石等)。在地层岩石中分布着大小、形态各异的缝缝洞洞,总称地层孔隙。这些孔隙有的是相互连通的,有的是互不连通的。相互连通的孔隙称为有效孔隙。有效孔隙的总体积称为有效孔隙体积,在石油工程和实验室中常常被用做流体体积的一种计量单位。岩石中有效孔隙体积占岩石总体积的百分比,称为有效孔隙度,用 Φ 表示。计算储量和评价油气层特性的孔隙度是指有效孔隙度。

油层岩石孔隙的形态、大小、分布状况、相互关系以及与孔间通道的组合方式,称为孔隙结构,它对油层岩石储集油(气)的能力、产油(气)的能力及驱油效率有直接的影响。

2. 岩石的渗透性

在压力差作用下,流体通过孔隙介质的能力称为孔隙介质的渗透性。衡量孔隙介质渗透性的物理量是渗透率,用 K 表示。当单相均质流体全部充满孔隙并呈层流流动,且流体与孔隙介质不发生明显的物理或化学作用时,所测得的渗透率,称为绝对渗透率。因为习惯上使用空气来测定孔隙介质的绝对渗透率,所以又将空气渗透率称为绝对渗透率,用 K_a 表示。绝对渗透率是孔隙介质本身的属性,仅取决于介质的孔隙结构,而与流体性质及所施加的压差大小无关,它是评价储层物性的重要指标。

孔隙介质的渗透性用达西定律描述。达西定律的定义是:在线性驱替中,流体在单位时间内通过孔隙介质的体积 Q 与作用在介质两端的压力差 Δp 和介质的横截面积 A 成正比,与流体黏度 μ 和流过距离 L 成反比:

$$Q = K \frac{A \Delta p}{\mu L} \quad (1-1)$$

式(1-1)中的比例系数 K 称为渗透率,其表达式为:

$$K = \frac{\mu L Q}{A \Delta p} \quad (1-2)$$

渗透率的单位是达西(Darcy)。1达西(D)是表示黏度为 $10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ ($1 \text{mPa} \cdot \text{s}$) 的流体,在两端压力差为 $9.80665 \times 10^4 \text{Pa}$ (1kgf/cm^2) 作用下,流过横截面积 1cm^2 (10^{-4}m^2)、长 1cm (10^{-2}m) 孔隙介质的流量为 $1 \text{cm}^3/\text{s}$ ($10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$) 时的渗透率,根据此定义:

$$1(\text{D}) = \frac{10^{-3}(\text{Pa} \cdot \text{s}) \times 10^{-2}(\text{m}) \times 10^{-6}(\text{m}^3/\text{s})}{10^{-4}(\text{m}^2) \times 9.80665 \times 10^4(\text{Pa})} \approx 10^{-12}(\text{m}^2) = 1(\mu\text{m}^2)$$

3. 油层的非均质性

油层岩石的成分、渗透性、孔隙结构以及厚度等并不是处处均一的,这一性质被称为油层的非均质性。非均质性是陆相碎屑岩的显著特点之一,是油田注水开采中影响注入水不均匀

推进的主要影响因素。油层越不均质,采收率越低。油层的非均质性包括宏观非均质性和微观非均质性。

宏观非均质性是指油层岩性、物性、厚度等在平面上和垂向上的差异。用于描述油层间渗透性非均质性的物理量是变异系数(K_v),它是指统计层段内各油层渗透率(K_i)的均方差与平均渗透率(K)之比:

$$K_v = \frac{[\sum_{i=1}^n (K_i - K)^2 / (n - 1)]^{\frac{1}{2}}}{K} \quad (1-3)$$

K_v 值越接近于 1,非均质性越强。一般来说, $K_v \leq 0.5$ 为均质型, K_v 在 0.5 ~ 0.7 范围为较均质型, $K_v > 0.7$ 为非均质型。

也可以通过岩心分析方法计算变异系数(K_v),其公式为:

$$K_v = \frac{K_{0.5} - K_{0.84}}{K_{0.5}} \quad (1-4)$$

式中, $K_{0.84}$ 和 $K_{0.5}$ 分别为所分析的岩心频率(将岩心渗透率从大到小排序,某岩心的序号与统计岩心总数之比称该岩心的频率)为 0.84 和 0.5 时所对应的绝对渗透率值。 K_v 值越小,表示油层越均质,绝对均质地层的 K_v 值为零。

在油藏工程中,也可用层间渗透率级差或单层突进系数来表达油层间渗透性的非均质性概念,前者是指统计层段内油层最大渗透率与最小渗透率的比值,后者是指统计层段内油层最大渗透率与各层平均渗透率的比值。

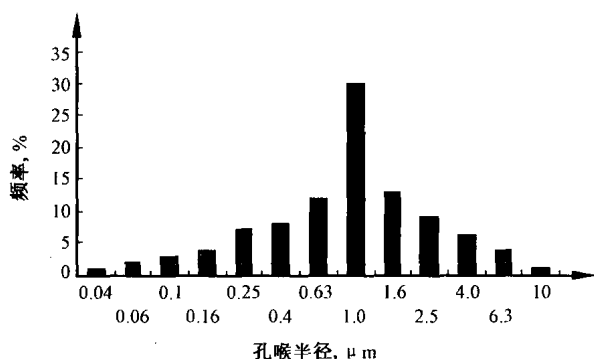


图 1-1 孔喉大小分布曲线

微观非均质性是指油层孔隙分布、孔隙结构以及岩石表面性质等在平面上和垂向上的差异,用孔喉大小分布曲线、孔喉比、孔喉配位数和孔喉表面粗糙度等表示,它们的具体含义如下:

(1) 孔喉大小分布曲线:如图 1-1 所示,横坐标表示岩石孔喉半径,纵坐标表示相应的分布频率。与峰值对应的半径数值为出现频率最高的孔喉半径。峰值越高,表示处于这一孔喉半径岩石的频率越大,处于这一孔喉半径以外岩石的频率

也就越小,岩石孔喉越均匀。

(2) 孔喉比:是指孔腹半径与孔喉半径之比。孔喉比越小,孔喉结构越均匀,越有利于提高驱油效率。

(3) 孔喉配位数:是指与一个孔隙相连的喉道数。配位数越大,油越容易分散,阻力效应越严重。

(4) 孔喉表面粗糙度:是指孔喉真实表面积与表观表面积之比。比值越大,表面粗糙度越大,润湿滞后越严重。

4. 油层流体的饱和度

油层孔隙中的流体有原油、天然气和地层水,其中某一种流体所占孔隙体积与地层总孔隙体积的比值,称为这种流体的饱和度,用 S 表示。 S_o 表示含油饱和度, S_g 表示含气饱和度, S_w

表示含水饱和度。不同采油阶段有不同的饱和度概念:油藏在原始状态时的含油饱和度,称为原始含油饱和度,用 S_{oi} 表示;油藏在剩余油(指注入流体未波及区域内的原油)状态时的含油饱和度称为剩余油饱和度;油藏在残余油(指在注入流体波及区域内残留的、未被流体驱走的原油)状态时的含油饱和度称为残余油饱和度,用 S_{or} 表示。存在于地层岩石颗粒表面、孔隙角隅以及微毛细管孔道中的不流动水称为束缚水或共存水。束缚水所占孔隙体积与地层总孔隙体积之比,称为束缚水饱和度,用 S_{wi} 表示。 S_{oi} 和 S_{wi} 的关系为:

$$S_{oi} = 1 - S_{wi}$$

5. 油层流体的表面张力

(1) 表面张力:如图 1-2 所示,假定有气—液两相互相接触,A、B 为两相之间的界面, M_1 、 M_2 为任意两个液体分子。 M_1 位于液体内部,受四周分子的作用力是对称的,分子在各方向所受的作用力处于平衡状态,合力为零。因此 M_1 可在液体内部自由移动而不需做功。 M_2 为气—液界面上的分子,它同时受到液体内部同类分子和相邻气体分子的引力。由于气体对液体的分子引力小于液体自身的分子引力,使 M_2 受到一个指向液体内部的合力。广而言之,一切表面层中的液体分子均受到一垂直于界面、指向液体内部的引力。因此,液体表面都具有自动收缩趋势。

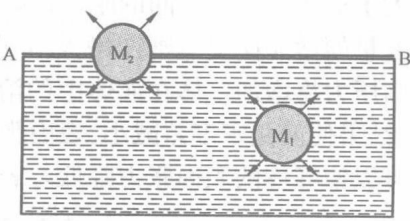


图 1-2 界面分子受力示意图

若体积一定,一切几何体以球体的表面积为最小。这也就是一些小水滴、汞珠常呈球形的原因(此时液滴重力不起主要作用)。如果要把一个液体分子从液体内部移到液体表面以增大表面积,就必须克服液体内部自身的分子引力而做功,所消耗的功将转化为表面层的能量——表面能。所消耗的功 W 与所增加的表面积 A 成正比:

$$W = \sigma A \tag{1-5}$$

式中,比例系数 σ 称为表面张力,它等于增加单位表面积所做的功,其表达式为:

$$\sigma = \frac{W}{A} \tag{1-6}$$

在热力学上可以证明,在恒温条件下,表面张力等于单位面积上的自由能(比表面自由能)。对于平面,表面张力的方向平行于气—液界面;对于弯曲面,表面张力的方向为沿气—液界面所做功的切线方向。增加表面积时,必须克服这个力而做功,这就是将 σ 称为表面张力的原因。表面张力各种单位的换算关系为:

$$1 \text{ erg/cm}^2 = 1 \text{ dyn} \cdot \text{cm/cm}^2 = 1 \text{ dyn/cm} = 10^{-3} \text{ N/m} = 1 \text{ mN/m}$$

根据表面张力的量纲,也可以将表面张力看作是作用于界面边界线单位长度上的力。在液—气、液—液、液—固、气—固、固—固界面上都存在表面张力。固—固界面上的表面张力无法用实验方法测量,所以一般只研究液—气、液—液、液—固、气—固间的表面张力。习惯上将存在于液—液、液—固、固—固界面上的表面张力称为界面张力,而将物质与本身蒸汽(或空气)接触时的界面张力称为表面张力。

表面张力产生的根本原因是分子间的引力。由于相同分子或不同分子之间分子引力的差异,不同物质之间具有不同的表面张力。表 1-2 为某些纯液体在常温下的表面张力,可见金属汞的表面张力最大,水的表面张力次之。