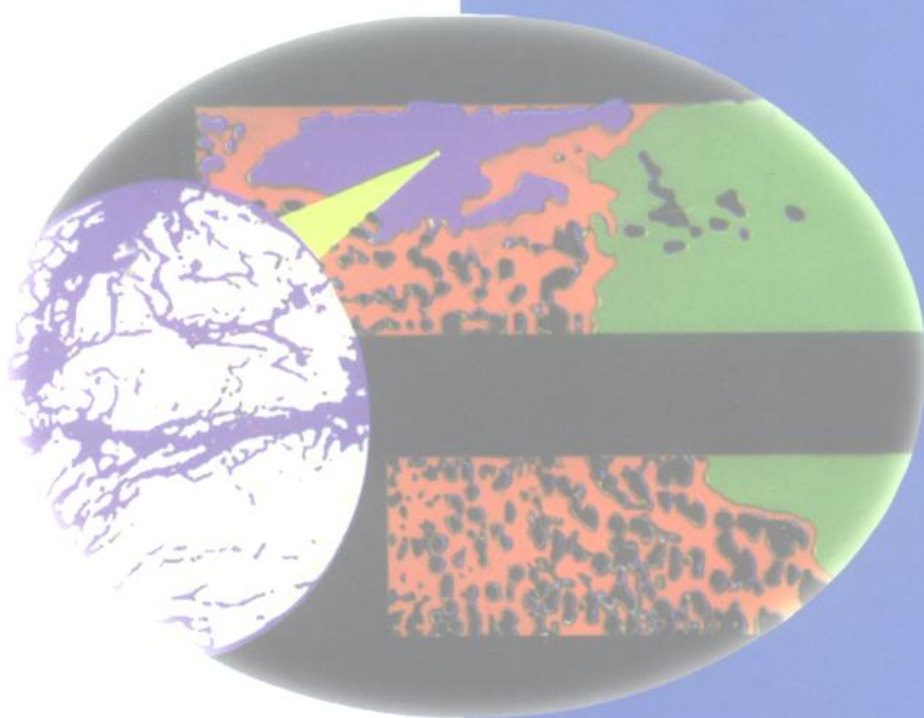




10

大港油田科技丛书编委会编

提高采收率技术



(北京)

7

石油工业出版社

PETROLEUM

INDUSTRY

PRESS

大港油田科技丛书 10

提 高 采 收 率 技 术

大港油田科技丛书编委会编

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书介绍了大港油田提高采收率技术, 内容包括: 油层物理基础实验、油藏三次采油方法筛选与潜力评价、聚合物驱油体系、碱/聚合物复合驱油体系, 循环注气提高凝析油采收率和微生物采油技术。另外, 介绍了6个矿场试验应用实例。

本书可供从事油田开发, 提高采收率的中青年科技人员和管理人员以及非本专业技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

提高采收率技术/大港油田科技丛书编委会编.

北京: 石油工业出版社, 1999. 7

(大港油田科技丛书; 10)

ISBN 7-5021-2671-6

I. 提…

II. 大…

III. 采收率 (油气开采), 提高

IV. TE357

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 30789 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云红光印刷厂排版

石油工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 16 印张 410 千字 印 1—2300

1999 年 7 月北京第 1 版 1999 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN7-5021-2671-6/TE·2125

定价: 30.00 元

大港油田精神文明丛书总编委

主 任：王 鹏 姚和清

副 主 任：张德寿（常务）

主任委员：孙希敬 陈玉瑾 高兰成 朱敬成 郭德宝 张大德
俞叔武 于庄敬 薛士荣 刘志谦 王鹤龄 于树方
蒋永佑 华勇魁 于秋云 王兴隆 段新坎 黄建庆
李润寿 张国欣

大港油田科技丛书编委

主 任：孙希敬

副 主 任：张大德 于庄敬（常务） 薛士荣

委 员：吴永平 曲经文 周嘉玺 李文瑞 马世煜 毛立言
宋伯韬 周学仁 李学文 刘鸿斌 牟祥汇 孙宝绪
李 淦 王巧月

序

大港油田三十多年来在勘探、开发和建设方面都取得了长足的进步，物质文明和精神文明建设结出丰硕成果，创造了许多成功经验，这些都是广大职工共同努力，发扬艰苦奋斗、顽强拼搏、无私奉献的创业精神的结果。为了使这些成果和经验系统化、理论化，形成财富，促进油田勘探开发建设进一步发展，经济效益大幅度提高，大港油田领导提出编写大港油田“科技丛书”。这个安排引起油田党委的重视，经过认真研究，决定扩大“丛书”编写范围，于1997年5月油田党、政联合下发文件，决定编撰“大港油田精神文明建设丛书”，成立了精神文明建设丛书编委会，下设七个系列，“科技丛书”是其中之一，并成立了编委会。

“科技丛书”怎样写，以哪些读者为对象，写成什么样的书，对这些问题我们花费了较长时间，听取了各方面的意见，进行广泛深入讨论，逐渐形成了明确的指导思想。大家认为这套“丛书”应有独特的品质，它不同于教科书，不同于科普读物，不同于论文集，不同于经验总结（成果汇编），也不同于工具手册。要突出“科技”和“大港”两个特色。“科技”特色是总结大港油田三十多年极其丰富的科学技术实践和创造发明，做到有理论基础、方法原理、实用程序和实践成果，在“科技”特色的基础上，突出“大港”特色，写出大港发明创造的技术，在国内外有影响的技术，使用过的技术，试验过的技术，并有成功和失败的实例分析，还要讨论一些技术的实用性和发展方向，全书不是简单的技术描述和实际案例分析，而是一次再提高再创造，使读者特别是中青年科学技术人员和各级管理干部，还有非本专业的技术人员，有原理可查，有方法可学，有实例可看，有经验可借鉴，起到承上启下的作用。

这套“丛书”为广大读者提供大港油田科技发展的历程。大港油田三十多年的发展建设，经历了风风雨雨，有成功的经验和失败的教训，学会借鉴前人的经验和教训，少走弯路，杜绝重复劳动，对我们事业的兴旺发达和科技人员成长都有一定的好处。“丛书”还展示了大港油田的科技全貌，反映了大港油田的技术状况，为广大青年技术干部、各级管理人员和非本专业技术干部了解油田技术状况修通了高速公路。还应说明，活跃在大港油田勘探开发早、中期各条战线的技术骨干，现在多数已经退休，在工作上完成了交接。有许多退休老专家参加“丛书”的编撰工作，把他们多年积累的宝贵经验留下来，也算老专家们在技术上对大港油田的干部职工有了个好交代。这套“丛书”正式出版适逢大港油田勘探开发建设三十五周年之际，谨以此书献给为大港油田建设做出卓越贡献的人们。

这套“科技丛书”，按照油田的习惯说法，包括十个专业共24册约800万字。即：

第一册 勘探历程与经验

第二册 第三系石油地质基础

第三册 油气藏与分布

第四册 新区、新层系、新领域

第五册 地质实验技术

- 第六册 地震勘探资料采集技术
- 第七册 地震勘探资料处理和解释技术
- 第八册 大港油田开发实践
- 第九册 枣园高凝高粘中低渗断块油田开发
- 第十册 提高采收率技术
- 第十一册 油气藏探边测试方法与应用
- 第十二册 钻井工程技术 (1)
- 第十三册 钻井工程技术 (2)
- 第十四册 钻井工程技术 (3)
- 第十五册 滩海工程技术
- 第十六册 录井技术
- 第十七册 测井技术 (1)
- 第十八册 测井技术 (2)
- 第十九册 电泵采油与分层注水
- 第二十册 防砂工艺技术
- 第二十一册 压裂与酸化工艺技术
- 第二十二册 试油与油井大修
- 第二十三册 油田地面工程设计与施工
- 第二十四册 石油炼制

为了编撰好“丛书”，确保达到设计要求，使各分册有个好质量，编委会认真研究精心设计各册编写提纲，这是写好“丛书”的基础。安排章节的作者力争由学科带头人执笔，分册负责人全文贯通，提出修改意见、把关，负责完成初稿，这是保证“丛书”质量的重要环节。然后由编委会组织 6 至 7 名专家进行审查定稿。尽管这方面我们做了不少工作，由于水平有限，错误在所难免，敬请读者批评指正。

孙希敬

1999 年 2 月 4 日

前 言

大港油田自 60 年代投入开发, 到 1998 年共投入开发 16 个油气田 25 个开发区, 动用地质储量 $5 \times 10^8 \text{t}$, 凝析油 $699.5 \times 10^4 \text{t}$ 。截止到 1998 年底采出程度 20.3%, 综合含水达 85%, 已进入中、高含水开采阶段。大港油田各开发区标定的水驱采收率平均值为 27.6%, 注水开发后仍有 72.4% 的储量残留在地下采不出来。油田发展的基础是油气资源, 在加强勘探增加新的油气储量的同时, 还必须提高原油采收率, 增加可采储量, 以保证大港油田的持续发展。

通常把油田开发过程按其驱替能量与驱替介质的不同划分为一次, 二次和三次采油。依靠油藏天然能量降压开采原油和天然气称之为一次采油, 通过注水、注气保持油藏压力开采的称之为二次采油, 而三次采油是通过更换驱替剂或应用物理、化学或生物的方法, 开采水驱后的剩余油。自 80 年代初, 大港油田开始进行提高采收率实验研究, 到 1986 年开展矿场试验至今已经历近 20 年的发展历程, 初步形成了适用于大港油田特点的提高采收率技术。提高采收率贯穿于一、二、三次采油的全过程, 而三次采油技术含量高, 风险大、成本高, 是涉及多学科的系统工程。本书所撰写的是大港油田提高采收率实验技术和矿场应用实例, 主要内容是三次采油室内实验技术。内容包括: 油层物理基础实验、油藏三次采油方法筛选与潜力评价、聚合物驱油实验技术与矿场应用实例、碱/聚合物驱油实验技术、循环注气提高凝析油采收率和微生物采油技术。每项提高采收率技术都阐述了提高采收率机理、实验方法和工艺技术, 已开展矿场试验的列举了应用实例。力求做到条理清楚, 有方法可学, 有实例可看。

本书第一章由许世宁、刘克长编写, 第二章由马立军编写, 第三章由杨怀军编写, 第四章由师树义编写, 第五章由冯庆贤编写, 第六章由马世煜编写, 第七章由陈智宇编写, 第八章由崔立宏编写, 第九章由刘金峰编写, 第十章由倪方天编写。全书由倪方天、师树义修改, 统稿。最后由张大德、孙希敬、于庄敬、马世煜、李文瑞、李淦、倪方天、何鲜审查定稿。

本书编写过程中的组织协调工作由华新生完成, 成书过程中的初步编排工作由刘群霞、柳江琳完成。本书编写过程中, 油田开发公司、科技发展部及地质研究院领导、开发所、化验中心、制图印刷厂等单位给予大力支持与帮助, 聚合物矿场试验区、井的生产动态曲线等资料由开发所张连春、王洪霞提供。在此一并表示感谢!

由于编写人员水平有限, 本书的不足乃至错误之处在所难免, 恳请专家和读者批评指正。

《提高采收率技术》编写组

1998 年 12 月

目 录

第一章 油层物性基础实验	(1)
第一节 岩石润湿性.....	(1)
第二节 毛管压力曲线.....	(7)
第三节 相对渗透率	(12)
第二章 油藏三次采油方法筛选与潜力评价	(19)
第一节 油藏地质及流体特征	(19)
第二节 油藏开发历程与开发形势分析	(24)
第三节 三次采油方法筛选与潜力评价	(28)
第三章 聚合物驱油技术室内实验	(55)
第一节 聚合物一般性质的测定	(55)
第二节 聚合物特殊性质测定	(59)
第三节 聚合物岩心驱油实验	(71)
第四节 聚合物调剖室内实验	(74)
第五节 聚合物防窜室内实验	(79)
第四章 碱/聚合物二元复合驱室内实验研究	(85)
第一节 碱型筛选实验	(85)
第二节 碱与聚合物的配伍性实验	(94)
第三节 岩心物理模拟实验	(98)
第四节 室内实验研究成果.....	(102)
第五章 微观透明模型驱油机理实验	(104)
第一节 微观透明模型与实验方法.....	(104)
第二节 水驱油机理实验.....	(107)
第三节 聚合物及碱/聚合物驱油机理实验	(110)
第四节 气驱及水/气交替驱油机理实验	(113)
第五节 双重介质水驱油机理实验.....	(117)
第六章 聚合物驱油的油藏工程研究与注入工艺技术	(119)
第一节 聚合物驱的层系划分与井网, 井距的选择.....	(119)
第二节 聚合物驱注入时机与注入速度的确定.....	(121)
第三节 聚合物溶液注入段塞结构的优选.....	(123)
第四节 注入设备与注入工艺技术.....	(125)
第七章 聚合物驱油矿场实例	(132)
第一节 港西四区先导试验区.....	(132)
第二节 港西四区扩大试验区.....	(144)
第三节 港西三区二断块西部聚合物驱矿场试验.....	(152)

第八章 凝析油气藏循环注气开采技术	(160)
第一节 凝析油气藏的基本概念及特点.....	(160)
第二节 凝析烃体系的相态研究.....	(165)
第三节 凝析气藏试井.....	(174)
第四节 凝析气藏储量计算.....	(177)
第五节 凝析气藏开发的气藏工程研究.....	(178)
第六节 凝析气藏开发配套技术.....	(182)
第七节 凝析气藏循环注气开发中的动态监测技术.....	(188)
第八节 大张坨凝析气藏循环注气开发实例.....	(190)
第九章 微生物采油室内实验与矿场应用实例	(207)
第一节 采油菌种开发.....	(207)
第二节 微生物与油藏适应性实验.....	(215)
第三节 岩心驱替实验.....	(217)
第四节 微生物发酵工艺.....	(218)
第五节 微生物吞吐矿场试验实例.....	(220)
第六节 微生物驱矿场试验.....	(222)
第十章 回顾与展望	(230)
第一节 大港油田提高采收率工作回顾.....	(230)
第二节 大港油田提高采收率工作展望.....	(233)
参考文献	(243)

第一章 油层物性基础实验

油层物性基础实验能获取油藏岩石润湿性、毛管压力曲线和油水相对渗透率曲线，这些参数既是油藏评价、数值模拟、开发方案编制、油藏工程研究的重要基础数据，也是提高油田采收率方法筛选和实验研究的重要基础资料。大港油田于 70 年代相继建立了油层物性基础实验项目，截止到 1998 年，大港油田共测定“岩石润湿性”样品 1576 块，“毛管压力曲线”样品 6942 块，油水相对渗透率曲线 645 条。本章主要介绍“油藏岩石润湿性”、“岩石毛管压力曲线”和“油水相对渗透率”实验技术。

第一节 岩石润湿性

一、原理

固体表面的润湿性是以附着张力来量度的。附着张力是表面张力的函数。它是油—固相界面和水—固相界面的界面张力差。它表示油或水对固体表面的附着张力，可以表示为：

$$A = \sigma_{os} - \sigma_{ws} = \sigma_{ow} \cos \theta \quad (1-1)$$

式中 A ——附着张力；

σ_{os} ——油—固界面张力；

σ_{ws} ——水—固界面张力；

σ_{ow} ——油—水界面张力；

θ ——固体表面上油、水、固三个交点切于液体界面之间的夹角，亦即润湿角或接触角。

当 A 为正值时， $\theta < 90^\circ$ ，表示水选择性的润湿；当 A 为负值时， $\theta > 90^\circ$ ，表示油选择性的润湿； A 为零时，则两相润湿固体的能力相同。所谓润湿性，就广泛上讲是指液体在分子力作用下在固体表面展开的能力或附着的倾向性。研究岩石的润湿性，可以认识各相流体在孔隙介质中的微观分布状态及流动能力，对判断注入水是否很好地润湿岩石表面，分析水驱油过程中的洗油能力，选择提高采收率方法及进行油藏动态模拟试验等方面都有十分重要的意义。通常把油藏岩石润湿性划分为水润湿、中性润湿和油润湿三种。

二、岩石润湿性的测量方法

岩石表面润湿性的测量通常采用接触角法、离心法和自吸法三种方法测定。大港油田常采用自吸法测定储集层岩石的润湿性。因此，本书对前两种方法只做一般性的介绍，重点讲述自吸法。

1. 接触角法

(1) 基本原理

假如一滴油附着在浸泡于另一流体（水）中的光滑且无孔隙的均质固体表面上，与固体表面形成一个接触角（图 1-1）。当油—水、油—固、水—固之间的界面张力相互作用并达到平衡时形成一个稳定的接触角，它们满足公式（1-1）。当接触角 $\theta < 90^\circ$ 时， A 为正值，表示该固体表面优先水湿；接触角 $\theta = 90^\circ$ 时， A 为零，表示该固体表面为中性润湿；接触角 $\theta > 90^\circ$ ，

A 为负值, 说明固体表面为油性润湿。

(2) 测定方法

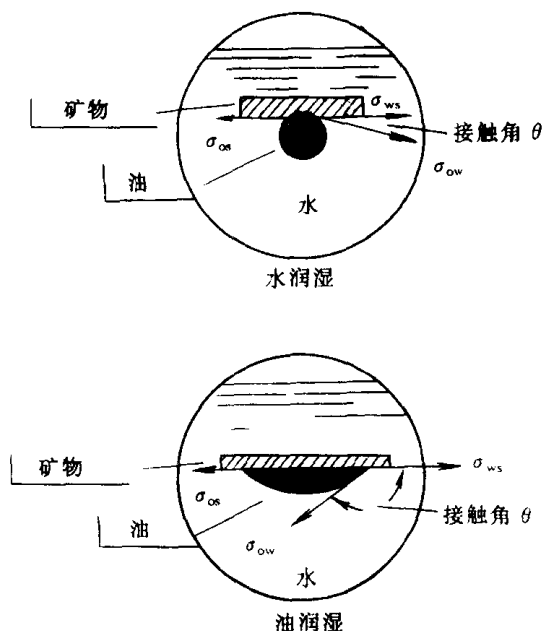


图 1-1 接触角测定原理示意图

1) 选取能代表油藏岩样主面成分的矿物作为固体。通常选用石英硅质矿物代表砂岩储层, 用方解石代表碳酸盐岩或者礁灰岩储集层。测定的固体表面要光滑清洁。

2) 测定的流体为该储层的流体。油样: 采用井底不含水的油样。要尽量避免测量过程中原油氧化。水样: 采用地层水。

3) 通常在常温常压下测定接触角。

4) 固体表面与第一种液体接触必须达到平衡, 通常需 24h 以上。然后令第二种液体进入固体表面, 待平衡后再测定其值, 通常达到平衡时间较长, 一般要几百个小时以上, 有的甚至更长。

5) 通常将水附着在浸于油中的固体表面所形成的接触角 (θ_{ws}) 称为前进角, 而油滴附着在浸于水中的固体表面所形成的接触角 (θ_{os}) 称为后退角。在通常情况下前进角和后退角是不相等的。

的, 这就是所谓的接触角 (或润湿性) 的滞后现象。

2. 离心机法测定润湿性

(1) 基本原理

离心机法测定润湿性基于“相对润湿性”的概念。对于两种流体而言, 其中必有一种比另一种更容易润湿岩石。利用离心机所产生的较大离心力将岩心毛管中可流动的液体排出。根据排出液体的多少, 按一定的比值来判断润湿性。

(2) 测定过程

把洗干净的岩样抽空饱和水后, 用离心机做油驱水, 求得驱替型毛管压力曲线 I。该曲线可模拟油藏束缚水饱和度随毛管压力的变化情况, 接着用离心机做水驱油, 求得吸入型毛管压力曲线 II, 最后再用离心机做油驱水, 得到驱替型毛管压力曲线 III (图 1-2、图 1-3)。图中 A_1 为曲线 III 下的面积, A_2 为曲线 II 下的面积, 如 A_1

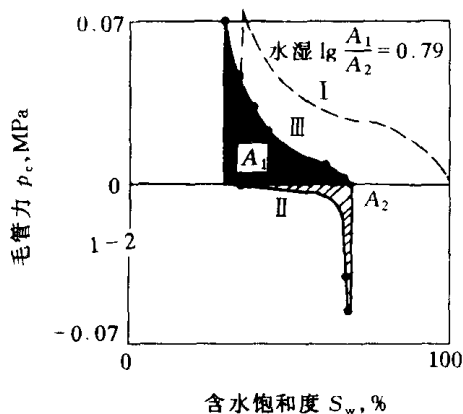


图 1-2 亲水岩石毛管压力曲线的面积比

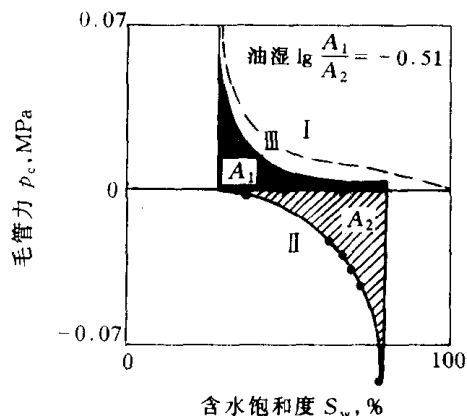


图 1-3 亲油岩石毛管压力曲线的面积比

$>A_2$ ，就表明油驱水所耗费的力比水驱油大，也就反映出油藏岩石为亲水型；如果 $A_1 < A_2$ ，则为亲油型；如果 $A_1 = A_2$ 就为中性润湿。

(3) 计算方法

通常把 $\lg(A_1/A_2)$ 定义为润湿指数。如果 $\lg(A_1/A_2) > 0$ ，则为水湿；如果 $\lg(A_1/A_2) = 0$ ，则为中性；如果 $\lg(A_1/A_2) < 0$ 为油湿。

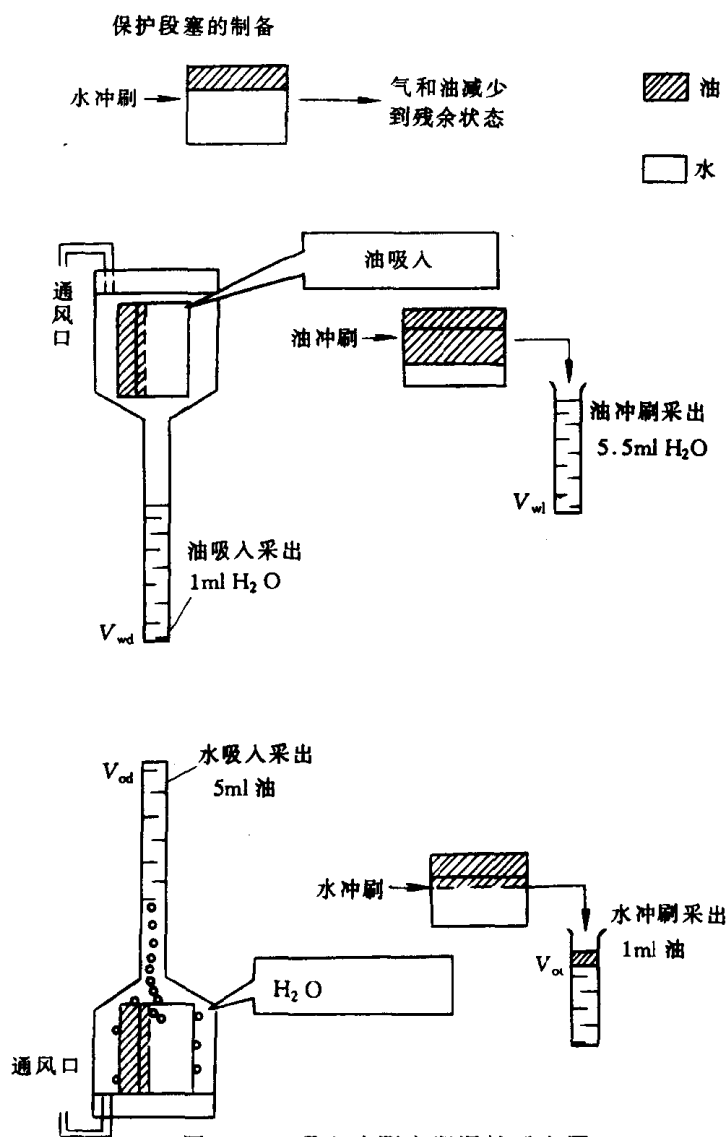
3. 吸入法

(1) 基本原理

根据润湿相在毛管压力的作用下，自发吸入的量与非润湿相被排出的量的相对能力来判别润湿性。

(2) 测定步骤

吸入方法见图 1-4 所示。



1) 将准备好的新鲜岩样或老化恢复的岩样装入夹持器或离心盒，采用驱替法或离心法，油驱使岩样达到束缚水状态。

2) 自吸水排油，当吸水排油量稳定不变时，记录岩样自吸水排油量 Q_{o1} 。

3) 采用驱替法或离心法, 对自吸水排油后岩样水驱达到残余油状态。记录岩样水驱排油量 Q_{o2} 。

4) 自吸油排水, 当吸油排水量稳定不变时, 记录岩样自吸油排水量 Q_{w1} 。

5) 二次油驱, 并记录油驱排水量 Q_{w2} 。

(3) 数据计算和润湿性判别

计算公式为:

$$W_w = Q_{o1} / (Q_{o1} + Q_{o2}) \quad (1-2)$$

$$W_o = Q_{w1} / (Q_{w1} + Q_{w2}) \quad (1-3)$$

$$I = W_w - W_o \quad (1-4)$$

式中 W_w 、 W_o ——水、油润湿指数, 无因次;

Q_{o1} ——岩样自吸水排油量, ml;

Q_{w1} ——岩样自吸油排油量, ml;

Q_{o2} ——岩样水驱排油量, ml;

Q_{w2} ——岩样油驱排水量, ml;

I ——相对润湿指数, 无因次。

润湿性判别:

用相对润湿指数判别岩石润湿性, 见表 1-1。

表 1-1 判别岩石润湿性的相对润湿指数

样品润湿性	强亲油	亲油	中间润湿			亲水	弱亲水
			弱亲油	中性	弱亲水		
相对润湿指数	$-1.0 \leq I < -0.70$	$-0.70 \leq I < -0.30$	$-0.30 \leq I < -0.10$	$-0.10 \leq I \leq 0.10$	$0.10 \leq I \leq 0.30$	$0.30 < I \leq 0.70$	$0.70 \leq I \leq 1.0$

三、润湿性的影响因素

1. 岩石矿物组成的影响

储层岩石矿物主要成分中石英、长石是亲水性的, 但亲水程度的强弱各不相同。

粘土矿物比石英、长石有更强的吸附性能, 特别是蒙脱石具有较强的吸水性, 因此, 当岩石表面被粘土矿物覆盖时, 会增强岩石的吸水性。而有些粘土矿物含有铁, 铁又具有从原油中吸附表面活性物质的能力, 因此, 当其覆盖在岩石颗粒表面上时, 会形成油湿。

2. 油藏流体性质的影响

油藏流体性质对润湿性的影响, 主要是指油和水的影响。从表 1-2 可以看出, 同样是石英, 当油相为异辛烷时, 接触角为 30° , 而为异喹啉时, 则为 158° 。当油相含环烷酸时, 水只能润湿石英表面 (润湿接触角为 35°) 而不能润湿方解石 (接触角为 106°)。

表 1-2 石英与方解石表面的接触角

岩石表面	水—异辛烷	水—异辛烷+异喹啉	水—异喹啉	水—环烷酸
石英表面	30°	83°	158°	35°
方解石表面	30°	48°	54°	106°

此外, 在水中存在某种金属离子或表面活性物质也会改变岩石润湿性。目前, 在三次采油中, 向水中添加某种表面活性剂, 可使界面张力明显降低, 改变岩石润湿性, 提高驱油效

率。

3. 矿物表面粗糙度的影响

在测定岩石润湿角时要求岩石矿物表面必须光滑，平整。而实际油层岩石表面是粗糙，各处表面能也不均匀。因此，岩石润湿性在各个部位有所差异，尤其是矿物颗粒的尖锐凸出部分及棱角部分。很多实验表明，尖棱对润湿周界来说常是难以克服的障碍，当润湿周界到达棱角时，就在棱角上边遇阻。此时，在棱角与三相润湿周界接触处的接

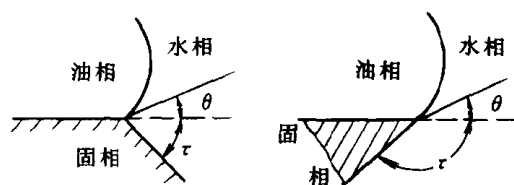


图 1-5 润湿接触角与形角 τ 的关系

触角上还应加上所谓的“形角” τ (图 1-5)。 τ 角愈大，则棱角对三相润湿周界沿固体表面移动的阻力就愈大。此时所测的润湿接触角就不能反映真实情况。

四、润湿性对水驱油的影响

油藏岩石润湿性控制着油、水的微观分布，并且在很大程度上决定残余油饱和度的大小和油水相的流动能力。图 1-6 表示水湿 [(a)、(b)、(c)] 和油湿 [(d)、(e)、(f)] 岩石孔隙中水饱和度的不同分布情况。

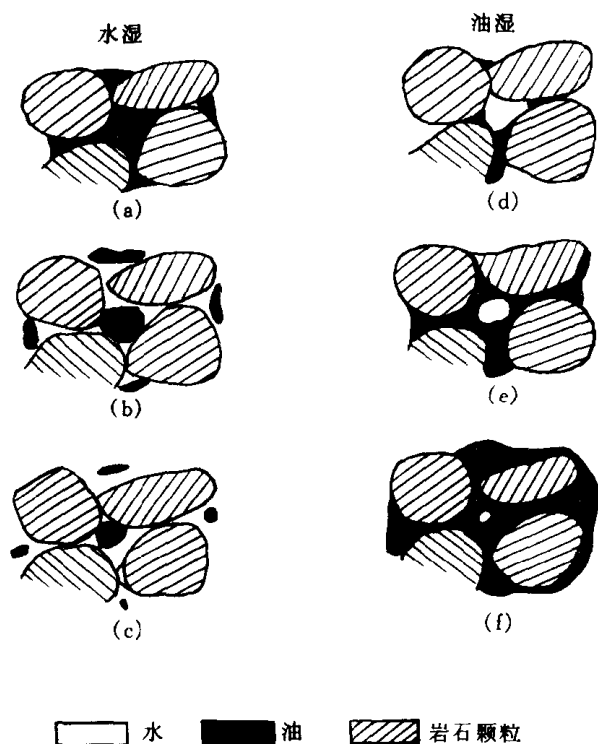


图 1-6 油水在岩石孔隙中的分布示意图

(a) 水—环状、油—迂回状；(b) 水、油—迂回状；(c) 水—迂回状、油—孤滴状；(d) 水—迂回状、油—环状；(e) 水、油—迂回状；(f) 水—孤滴状、油—迂回状

当岩石颗粒表面为亲水时，水则附着于颗粒表面：(a) 当含水饱和度很低时，水便围绕颗粒接触点形成一个水环，称之为“环状”分布。由于含水饱和度非常小，这些水环既不能互相接触，又不能彼此连通起来。因此，它们是不能流动的，而是以束缚水状态存在。与此同时，油则处于“迂回状”分布连续存在于孔隙中间，在压差作用下，形成渠道流态参与流动。(b) 当含水饱和度增加时，水环的大小随之增加，直至增到水环彼此连通起来，成为“共存水”的一种形式，它能否流动决定于所存在的压差大小。含水饱和度增大高于共存水饱和度后，水也成为“迂回状”分布而参与流动。(c) 随含水饱和度进一步增加，最终油则失去连续性并破裂成油珠，油滴，称为“孤滴状”分布，油滴虽然靠水流能将其带走，但它很容易遇到狭窄的喉断面而被卡住，形成对液流的阻力。当岩石颗粒表面亲油时，油水分布状态及其饱和度的变化与亲油时的情况相反，如图中 (d)、(e)、(f) 所示。

在水驱油过程中，对于亲水岩石，随着含水饱和度的增加，水除了附着于颗粒表面的水膜和边角处之外，还取渠道流动驱油。而残余油占据死胡同孔隙及很细的连通喉道，也有少部分的油被水分割成孤立的油滴而被包围。当油藏岩石为亲油时，水为非润湿相而首先取道于流通性较好的孔隙。继续水驱时，水才逐渐侵入较小的孔道并串联起来，形成新的水流渠

道。残余油除了一些停留于小的油流渠道内，其余的则在大孔道表面形成油膜，水很难将油膜从岩石表面驱走。当岩石是中等润湿性时，经水驱替后的残余油除了占据死胡同孔隙外，还有许多小油滴附在孔隙的岩石壁上。

五、岩石润湿性测定结果

岩石润湿性测定结果见表 1-3。

表 1-3 大港油田岩石湿润性测定数据表

油田	层位	井数	样品块数	实验温度 ℃	孔隙度 %	空气渗透率 $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	V_w/V_p %	V_o/V_p %	润湿性
板桥	沙一段	10	84	50~70	5.9~29.4	<1~5830	1~57.2	0	弱—强亲水
港东	明一下	3	60	62~67	13.5~42.2	115~8034	3~45.7	0	弱—强亲水
	馆陶组	2	70	50~67	15.2~41.3	3~10507	2.7~55.8	0	弱—强亲水
马西	沙一下	3	101	50	2.8~18.5	<1~33	6.4~35.9	0	弱—强亲水
马东	沙一下	2	28	50~80	10~22	0.5~174	1.8~33	0	弱—中亲水
联盟	沙一下	1	6	50	7.2~18.7	<1~5	5~23	0	弱—中亲水
六间房	沙三段	1	10	70	7.2~13.5	0.3~1.9	6~19	0	弱亲水
港中	沙一下	3	14	50	17.7~28.1	6~1260	4.5~42.7	0~7.8	弱—强亲水
港西	馆陶组	1	9	50	29.4~35.4	345~12002	10.2~18.8	0	弱亲水
王徐庄	沙三段	2	41	67	13.1~3.4	2~393	2.7~25	0	弱—中亲水
羊三木	馆陶组	2	30	50~60	27.5~37.2	39~14146	2.5~37	0	弱—强亲水
孔店	馆陶组	6	41	50~59	24.7~37.3	1916~11356	0.9~30.1	0	弱—中亲水
扣村	沙一下	1	8	50	24~35.2	138~604	14.7~32.9	0	弱—中亲水
羊二庄	明下段	6	60	50~67	18.7~35.8	16~8351	3.2~37.8	0	弱—强亲水
	沙三段	4	48	70	4.0~26.8	0.1~955	3~30	0	弱—中亲水
羊二庄	沙一段	1	15	70	4.4~21.0	0.05~550	2~38	0	弱—强亲水
枣园	孔一段	10	162	50~75	14.4~38.6	0.9~1141	0.4~57	0	弱—强亲水
	孔二段	5	72	70	12.3~28.1	0.1~638	0.4~30	0	弱—中亲水
	中生界	5	22	75	2.3~26.4		0.4~19.4	0	弱亲水
王官屯	孔一段	2	28	70	12.7~26.4	4.0~676	1~34	0	弱—中亲水
	中生界	2	48	70	6.4~26.2	0.3~508	0.4~8.4	0~7.7	偏亲水—中性
段六拔	孔一段	3	62	63~70	6.5~21.9	3~353	1.2~34	0~2	弱—中亲水
小集	孔一段	8	254	60~75	6.2~35.6	0.4~1291	1.0~32	0	弱—中亲水
舍女寺	沙三段	3	23	70	15.7~29.7	7.7~1045	1.0~15.7	0	弱亲水
	中生界	2	20	70	8.5~20.8	0.2~78	2.5~42.6	0	弱—强亲水

表中，利用吸水量占孔隙体积的百分数判别润湿性：

强亲水：吸水量所占孔隙体积 (V_w/V_p) 大于 35%；

中亲水：吸水量所占孔隙体积 (V_w/V_p) 小于 20%~35%；

弱亲水：吸水量所占孔隙体积 (V_w/V_p) 小于 20%；

偏亲水：吸水量大于吸油量。

其中， V_p 为岩样孔隙体积， V_w 为岩样自吸水量。

此外,自1980年以来大港油田共钻密闭取心井21口,所取岩心在注水开发过程中,经过了长期水冲刷。岩石润湿性测定结果显示,经过长期注水开发,水洗后岩心的润湿性、亲水性增强。

第二节 毛管压力曲线

一、毛管压力基本概念

毛管压力定义为由一弯曲界面分开的两种互不相溶的流体之间的压力差,这两种流体可以是两种液体,也可以是一种气体和一种液体。

弯曲液面引起的毛管压力可用式(1-5)计算:

$$p_c = \sigma(1/R_1 + 1/R_2) \quad (1-5)$$

当界面形状为半球形时, $R_1 = R_2$, 则有:

$$p_c = 2\sigma/R \quad (1-6)$$

当毛细管中有两种流体时, $R = r/\cos\theta$ (见图1-7), 此时, 毛细管压力为:

$$p_c = 2\sigma\cos\theta/r \quad (1-7)$$

式中 R_1, R_2 ——液面的两个主要垂向截面的曲率半径, 指向液体内部时为正值;

σ ——流体的界面张力;

r ——毛细管半径;

θ ——毛细管管壁和液面之间的接触角。

压力小的流体在两种不混溶流体界面的凹面, 一般称此流体为润湿相。在油—水、气—水体系里, 润湿相大多是水相; 非润湿相居于界面的另一面, 大多是油相或气相。

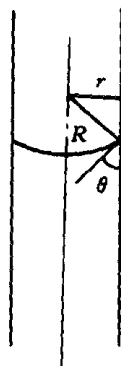


图1-7 毛管压力示意图

图1-8中的曲线表示在颗粒均匀、分选好的砂岩岩样中进行油驱水时岩心饱和度的变化过程。当压力从A点升到B点以前, 油未进入岩心, 直到压力达到B点时, 油才开始挤进岩样。通常称此压力为排替压力(或门槛压力)。从B点到E点, 压力稍有增加, 油饱和度将大幅度增加; 而压力从E点升到F点时, 虽然压力上升了很多, 但油饱和度却增加很少, 仅为10%左右, 继续增加压力到C点, 油饱和度没有明显增加, 当然水饱和度也没有明显减小。通常, 当压力增加而水饱和度不再减小时, 称此水饱和度为束缚水饱和度。这种压力与饱和度的关系曲线称为毛管压力曲线。

图1-8的毛管压力曲线是用非润湿相(油)驱替润湿相(水)得到的, 称为驱替毛管压力曲线。当用润湿相(水)驱替非润湿相(油)时, 得到的毛管压力曲线称为吸入毛管压力曲线。

图1-9是驱替、吸入毛管压力曲线, 可以看出两条曲线有较大差别。这一现象称为滞后现象, 也反映润湿性对毛管压力曲线有一定影响。

二、毛管压力测定方法

1. 半渗透隔板法

半渗透隔板法利用外加压力(抽真空或加压)与毛细管压力平衡的原理测定毛管压力曲线。测定装置见图1-10。在压力的作用下, 油克服毛细管压力进入岩样并将饱和在岩样中的水排驱出来, 计量排出水量。不断提高压力, 每提高一级压力, 计量一次排出水量, 绘制 p_c

— S_w 关系曲线，即得毛管压力曲线，见图 1-11。

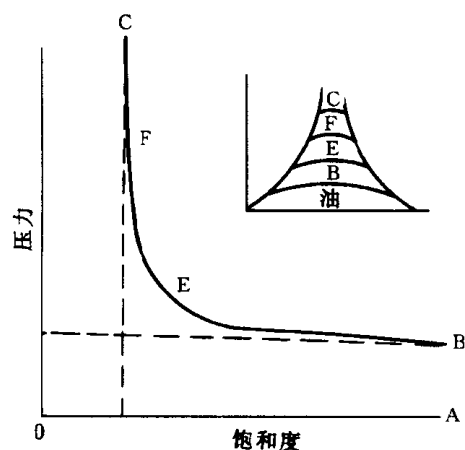


图 1-8 毛细管压力曲线

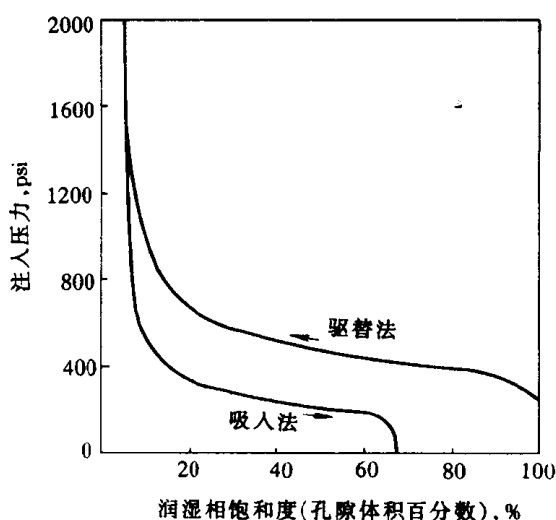


图 1-9 水银注入毛细管压力曲线（吸入和驱替）

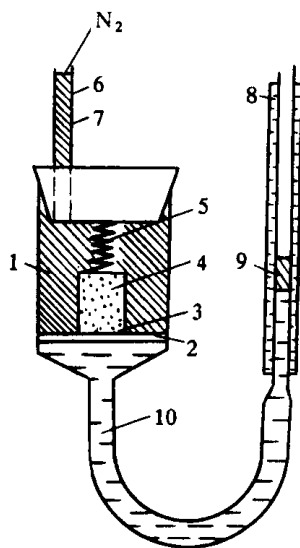


图 1-10 半渗透隔板法测定毛管压力装置图

1—玻璃漏斗；2—半渗透隔板；3—滤纸；4—岩样；5—弹簧；
6—接氮气瓶；7—油；8—刻度板；9—润滑油；10—水

2. 离心机法

离心机法通过离心机高速旋转所产生的离心力测定毛管压力。其方法是将被水饱和的岩样放入岩样盒中，外部充满油。在离心机的高速旋转下，由于岩心中水相与岩心外油相的密度差，将产生不同的离心力，离心机转速越高，离心力差就越大，克服毛管的压力也越大，油就能进入更小的孔隙。测量一系列离心机的稳定转速及在该转速下离心出的润湿相的流体量，就能求得该岩心的毛管压力曲线。图 1-12 为示意图。

不同转速下两相流体的离心力差等于毛管压力，因此可用下式计算毛管压力：

$$p_{ci} = 1.097 \times 10^{-8} \Delta \rho L (R_c - L/2) n^2 \quad (1-8)$$

相应岩样内平均剩余润湿流体饱和度为：

$$S_{\text{平均}} = 1 - (V_w/V_p) \quad (1-9)$$

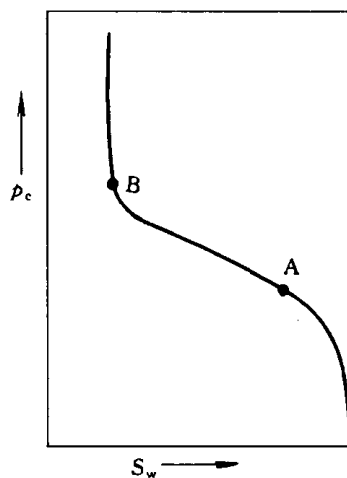


图 1-11 毛细管压力曲线