

[法]Bernard Ollivier & Michel Magot 编著

张煜 张辉 郭省学 译

石油微生物学

Petroleum Microbiology



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

内 容 提 要

本书与以往关于石油微生物的书籍有所不同，它不仅包括了碳氢化合物的代谢和溢出原油的生物修复，还提出了最新的油藏生态学。通过阐述微生物在原油生产和应用中的作用，让读者明白如何使微生物对原油的有害作用变得有益。

本书为微生物学家和对石油微生物感兴趣的专业人员提供了宝贵资源。

著作权合同登记 图字：01-2009-7413 号

Petroleum Microbiology/Bernard Ollivier, Michel Magot.

Copyright © ASM Press, 2005. All rights reserved. Translated and published by arrangement with ASM Press, Washington, DC; USA.

中文版权为中国石化出版社所有。版权所有，不得翻印。

图书在版编目 (CIP) 数据

石油微生物学 / (法) 伯纳德等著；张煜，张辉，郭省学译.
—北京：中国石化出版社，2011.3
ISBN 978-7-5114-0664-4

I. ①石… II. ①伯… ②张… ③张… ④张… III. ①石油微生物 IV. ①Q939

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 027091 号

未经本社书面授权，本书任何部分不得被复制、抄袭，或者以任何形式或任何方式传播。版权所有，侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址：北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编：100011 电话：(010)84271850

读者服务部电话：(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 426 千字

2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷

定价：100.00 元

前言

科学与科学的应用紧紧联系在一起，一如果实与孕育它的树一样。

——路易斯·巴斯德，1871 年

巴斯德简明地阐释了科学研究的往复渐进性：活跃的好奇心引发人们对自然现象的研究，接着令其按人所需而改变。在科学的应用过程中遇到的问题又会导致新的科学发现。该过程在石油开发中同样适用。比如，对多孔介质中流体物性的深入研究提高了石油采收率，结果导致石油成为大多数工业国家的主要能源。在工业社会，石油的应用极大地提高了其经济和生活水平。然而，随着石油资源的品质和有效储量的持续降低，对剩余资源的有效开发利用成为人们必然的理智选择。本书的热点在于描述了在决定石油资源的品质和有效开发中扮演关键角色的微生物。

最近 20 年的研究显示，油藏中微生物群落的活性和种类影响着可采原油的品质和储量。微生物的活动在石油开采中既有有利的一面，也有不利的一面。对于石油行业的专业人员来说，通过了解调控微生物活动的因素来加强微生物的有益活动，限制其不利活动是非常重要的。本书阐述了微生物在原油生产和应用中的作用，让读者知道目前对原油的有害作用是如何可以朝着有利方面进行改变或者调控的。石油开采是个复杂的问题，需要综合包括微生物学、地球化学和工程学等多个学科的知识加以解决。本书在解决该问题上提供了重要的资源，微生物学家将可获得一个有关微生物学研究的最新领域，而对其他诸如材料科学、地球科学和石油工程科学等学科的专业人士来说，将对油藏微生物如何生存有一个简明而全面的了解从而指导他们的实践。

本书的目的之一是改变工业上人们认为的“油藏是个无菌的环境，没有微生物存在”的概念。实际上，我们目前已知油藏中存在着变化复杂的微生物群落。为了经济有效开采原油，我们必须了解支持这些种群活动的一系列物理、化学及微生物作用。书的第一部分是概述油藏的微生物生态及其地面设施。通过几个重要微生物组群的生理学和生态学，例如降解硫酸盐的细菌、产甲烷菌、超高温微生物、发酵细菌以及化能自养细菌等展示了内源微生物的多样性和动态性。这些章节让读者对自然环境中微生物的活动状况有一个初步了解。

微生物的活动在石油开采中是一把双刃剑，通常被认为是造成生产管柱及地面设施的腐蚀、注入管线的堵塞、地面设备的生物结垢及油藏的酸化（硫化氢产物）等有害方面的重要因素。本书第二部分深入地分析了微生物危害石油开采的机理并探讨了可能控制这些有害作用的办法。第三部分则讨论了微生物在原油生产方面的有益作用。例如可以通过投加硝酸盐或者亚硝酸盐抑制和减少硫酸盐还原菌的活动从而控制油藏的酸化。另外，了解了关于由微生物引起的碳氢化合物的代谢机理可以用于控制石蜡沉积从而提高石油的品质。通过调整营养可以对油藏中的微生物种群和生理进行调控，达到刺激微生物的活动来提高原油产量。

第四部分是关于环境修复中的石油烃及其精炼产物的生物降解的最新进展，降解碳氢化

化合物的微生物种类的多样性和数量都非常大，因此微生物能够代谢和降解不同化学结构的物质。最近 15 年，研究发现厌氧微生物也具有降解碳氢化合物的能力。例如羧化作用和延胡索酸盐的加入可以激活碳氢化合物的厌氧分解作用，这是新颖独特的。碳氢化合物的好氧和厌氧降解活动为生物修复提供了多样性的选择。通过添加限制性的营养和/或氧气的方式能够修复环境敏感区如海滩、江口或者饮用水含水层等的溢出原油污染。如果对环境对人类健康的风险较低，自然驯化也可以降解碳氢化合物。了解限制微生物活动的生态因素(碳氢化合物代谢等)，如缺乏合适的电子受体、必需的营养和代谢活性，这些都是影响成功修复的基础。

本书与以往关于石油微生物的书籍有所不同。早前的书籍专注于碳氢化合物的代谢和溢出原油的生物修复。该书不仅包括了这些热点，还提出了最新的油藏生态学。人们可以通过控制微生物活动使油藏中的复杂的微生物种群发生可预见的变化。大多数人认为微生物是引起腐蚀或酸化等有害活动的原因，然而他们没有认识到导致这些活动的因素或者如何更好地控制它们。本书展示了石油微生物是如何活动的，因而我们可以采取措施进行控制，这将是微生物学家和对石油微生物感兴趣的专业人员的宝贵资源。

MICHAEL J. MCINERNEY

俄克拉荷马大学，俄克拉荷马州诺曼市

目 录

第一部分 油藏与石油微生物	(1)
第 1 章 油藏与石油开采	(1)
第 2 章 油田中的内源微生物群落	(13)
第 3 章 还原硫酸盐的细菌和古菌	(24)
第 4 章 油田中的超嗜热产甲烷古菌	(43)
第 5 章 发酵性、铁还原和硝酸盐还原的微生物	(57)
第二部分 微生物活动的不良影响	(74)
第 6 章 地下储层中原油的生物降解	(74)
第 7 章 储层酸化的机制与预防	(99)
第 8 章 石油工业的微生物腐蚀	(114)
第 9 章 石油工业中生物膜的危害	(134)
第三部分 生物技术和石油开采	(156)
第 10 章 微生物控制油藏中 H_2S 的产生	(156)
第 11 章 微生物提高原油采收率技术	(166)
第 12 章 石油的生物精炼技术	(185)
第四部分 烃污染区的生物修复	(200)
第 13 章 烷烃加氧酶的多样性、功能及应用	(200)
第 14 章 烃的厌氧生物降解	(217)
第 15 章 燃料醚的生物降解	(239)
第 16 章 海上溢油的生物修复	(253)
第 17 章 原油污染环境中烃厌氧降解代谢的指示剂	(275)

第一部分 油藏与石油微生物

第 1 章 油藏与石油开采

本章将简单系统地介绍油藏与石油开采系统，包括以下 4 个方面：①油藏简介；②油藏流体介绍；③采油机理阐述；④钻井工艺和地面设施介绍。

一、油藏简介

（一）石油形成的三个阶段

确切地说，石油系统包括了 3 个部分：生油岩、盖层、储集层，缺少其中任何一个地质因素，油藏都无法形成。同时，任何油藏的形成还必须具备第 4 个因素：圈闭。

1. 生油岩

生油岩是产生并排出原油的岩石。通常认为油气流体是在埋藏过程中，由沉积物中的矿物有机质热解生成的。该过程可能是迄今为止发现的最重要的油气来源，但一些油气流体也明显来源于无机质。

有机质沉积并转化为干酪根，该过程分为 3 个阶段：第 1 阶段是成岩作用。干酪根中的沉积有机质称之为烃源岩，热解过程称之为退化作用。氧化作用和好氧生物降解作用抑制原油从沉积物中排出。

地球化学家依据含氢指数和含氧指数(HI/OI)，将干酪根进行划分。含氢指数和含氧指数通过高温分解沉积物并经色谱分析获得；含氧指数通过整合二氧化碳峰值计算得到，含氢指数通过整合烃峰值计算得到。因此，含氢指数越高，说明退化过程中烃含量越高。有机质来源和氢/碳比率不同，油气流体的油/气比率有所差异。

依据不同来源的有机质和不同的沉积过程，干酪根可以划分为 3 种类型(见表 1-1)。

表 1-1 干酪根类型

参 数	干酪根类型		
	类型 I	类型 II	类型 III
H/C	高	高	低
O/C	低	低	高
来源	藻类、细菌	海相浮游动、植物	陆地植物
生油潜能	高	中等	低

随着地层压力和温度的增加，有机质的转化与石油的成熟过程相对应。范克雷维伦图(见图 1-1)反映了原油成熟的不同阶段。

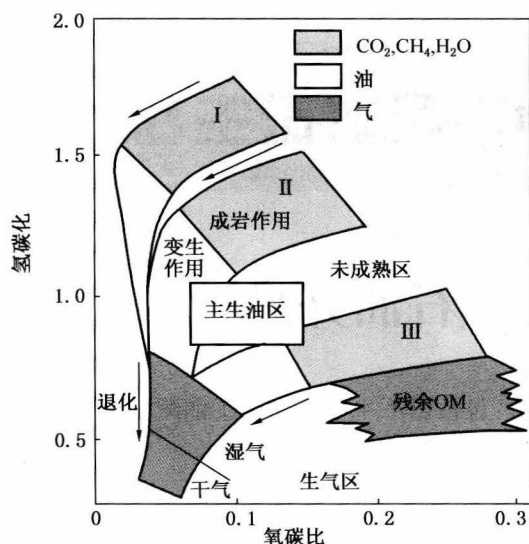


图 1-1 Van Krevelen 类型图

第 1 阶段是成岩阶段，微生物降解有机质。由于温度的增加，该过程历时较短。有机质降解生成二氧化碳和水，O/C 比值较 H/C 比值下降快，这是非成熟阶段。

第 2 阶段是退化阶段，生成原油和湿气。该阶段由于热裂解作用，H/C 比值较 O/C 比值下降快。该阶段相对应的地层温度为 50 ~ 150℃，埋深 1.5 ~ 4km。

第 3 阶段是产气阶段，在 120 ~ 200℃，C—C 键断裂，H/C 比值下降很快。

2. 储集层

储集层像一块海绵既可以存储液体，也可以排替液体。通常，这类岩石具有巨大的存储碳氢化合物流体的能力；这种存储能力主要依靠于他们的多孔介质。

总孔隙度是岩石样品中所有孔隙空间体积与该岩样总体积的比值(一般用百分数来表示)。有效孔隙度是指那些互相连通的，可以允许流体在其中流动的孔隙，它是一个非常重要的参数。一般有三种类型的孔隙被认为是有效孔隙：粒间孔隙，粒内孔隙和裂缝孔隙。

另一种分类是将孔隙分为原生孔隙和次生孔隙，这主要是由于沉积物转变成岩固岩石的成因不同而得(成岩作用)。岩石一般需要经历压实、胶结和再结晶的过程，而压力、温度和水循环量是其主要的影响参数。天然岩石孔隙度一般在 0 ~ 40% 之间；砂岩一般为 10% ~ 40%，砾岩和石灰岩一般为 5% ~ 25%，白砂岩一般为 40%。孔隙体积主要由 100μm 大小的孔道组成，其宽度大约为 20μm。

渗透率是岩石允许液体流过的能力。其单位一般用达西和毫达西表示。一般而言，若要达到原油的经济可采产量通常需要至少 10 毫达西的渗透率，但是相对于气体而言其渗透率可以小于 1 毫达西。渗透率可以分为两种即水平渗透率和垂直渗透率。一般而言，垂直渗透率大概比水平渗透率小一个数量级。

石油储集层中的原油总量，主要取决于其孔隙度和饱和度。流体饱和度是指储层岩石孔隙中一单位孔隙体积中所包含流体的体积，以百分数表征。由于在原油进入储集层中之前在孔道空间中已经有一定量的水分散，从而导致原油饱和度不可能达到 100%。并且在原油流动过程中，储集层中的水不能完全被排挤出来。

3. 盖层

盖层的作用是阻止烃类运移，形成油气藏。烃类流体通常比水轻，一旦形成便会向上逸散。只有非渗透性岩层能限制烃类运移。盖层类似于塑料，不会发生断裂，具有低孔隙和低渗透性的特点。常见盖层的岩石类型有泥质岩类、膏盐类和致密灰岩类。盖层岩石孔隙的毛细管压力很高，能够阻止油气逸散。

(二) 圈闭

储集层中能阻止油气继续运移，并能在其中聚集起来的地质构造。圈闭必须具备 3 个组成部分：①储存油气的储集层；②储集层之上有防止油气散失的盖层；③有阻止油气继续向四周运移的遮挡条件。当组成圈闭的 3 部分配合良好时，储集层便处于上方和四周被不渗透岩层所

包围或阻隔的状态,当有油气进入时,便可被捕获而聚集形成油气藏。烃类运移过程中形成具有封闭盖层的油气藏并不常见,因此成藏时间对油气藏的形成至关重要。通常圈闭分为3大类:构造圈闭、地层圈闭和复合圈闭,构造圈闭主要包括穹窿圈闭和背斜圈闭(见图1-2)。

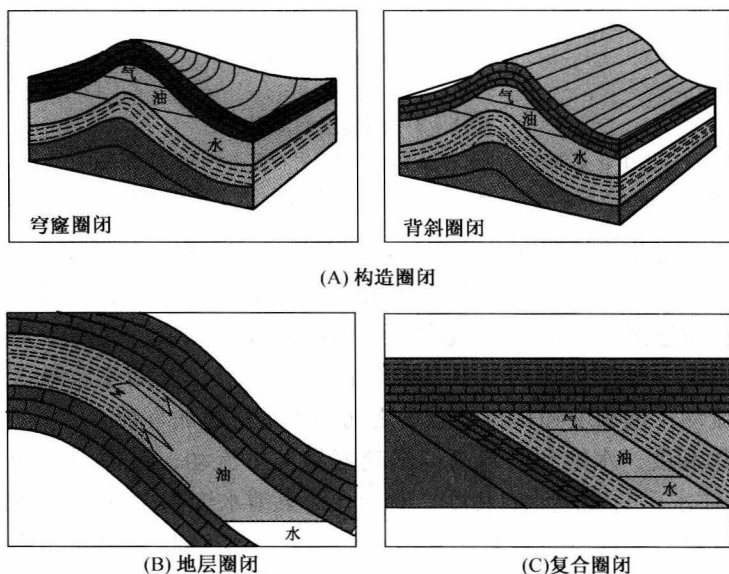


图1-2 圈闭的3种类型

总之,一个油气藏的形成依赖于3方面的因素:①沉积作用(各类岩石的形成);②成岩作用和退化作用(有机质的转化);③地壳运动(圈闭的形成)。

二、勘探和储集层性质

通过油井钻探,已对地表下7km以内的沉积盆地进行了研究。每增加100m,地层压力增加1000~2500kPa,温度升高3℃,因此地表下7km的温度达200℃,压力达到100000kPa。目前大部分的研究都局限于埋深1~4km、温度50~150℃、地层压力10000~50000kPa的油藏,但越来越多的研究都针对埋深更深的沉积物或深水区(>500m)。近年来,由于在深水环境中也发现了石油,油气流体的生物降解受到了广泛关注。

(一) 油田勘探

油田勘探主要是地质学家和地球物理学家的的工作。他们寻找具有良好生油岩、盖层、储集层和圈闭的油藏,根据钻井数据和地震数据评价油气资源,钻探探井。近年来,随着技术的发展,在深水区域也发现了油气藏的存在。

一旦发现了油气藏,就需要通过进一步的研究分析,确定油藏的开发潜力、开发计划,以及地面设备。以上研究需要通过计算机模拟油藏流体分布情况,地质学家和油田工程师根据油井数据、地震数据、岩心分析,并结合地质学概念构建了多种模型,模拟油藏空间展布和计算流体储量。

(二) 储集层性质

孔隙度、润湿性、渗透率、饱和度和毛管压力是储集岩最重要的5个性质。

在存在固、液、气(或液)3相的情况下,液体在分子力作用下在固体表面的流散现象称为润湿(见图1-3)。

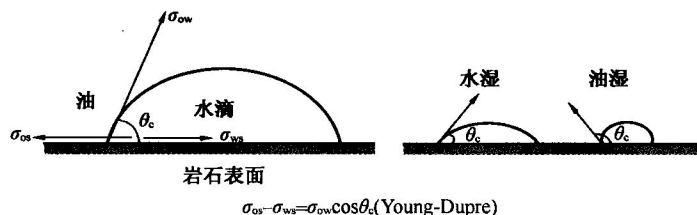


图 1-3 储集层润湿性

图中 σ 是油水、油和岩石界面、水和岩石界面之间的界面张力

依据 Young - Dupre 方程式, $\theta_c < 90^\circ$ 时, 岩石表面为亲水性; $\theta_c > 90^\circ$ 时, 岩石表面为亲油性

依据动态分析, 可将渗透率划分为 3 类: 绝对渗透率、有效渗透率和相对渗透率。绝对渗透率在“储集层”表述; 有效渗透率是两种或两种以上流体通过岩石时, 所测出的某一相流体的渗透率。相对渗透率是有效渗透率与绝对渗透率的比值, 反映了每一种流体的饱和度。相对渗透率影响一种流体相对于其他流体的流动情况, 是储集层最重要的性质。如果油、气、水同时流动, 饱和度和相对渗透率之间的关系将更加复杂。

S_{wi} 是束缚水饱和度, 水饱和度越高, 水越容易发生流动; 流体的流动可以通过相对渗透率计算。 S_{orw} 是注水后的残余油饱和度。对于 S_{wi} (束缚水饱和度) 而言, 油饱和度、油相相对渗透率都是最重要的储层参数。在石油开采过程中, 油饱和度和油相相对渗透率都会降低。因此, 原油采出程度越大, 开采难度也越大 (见图 1-4A)。

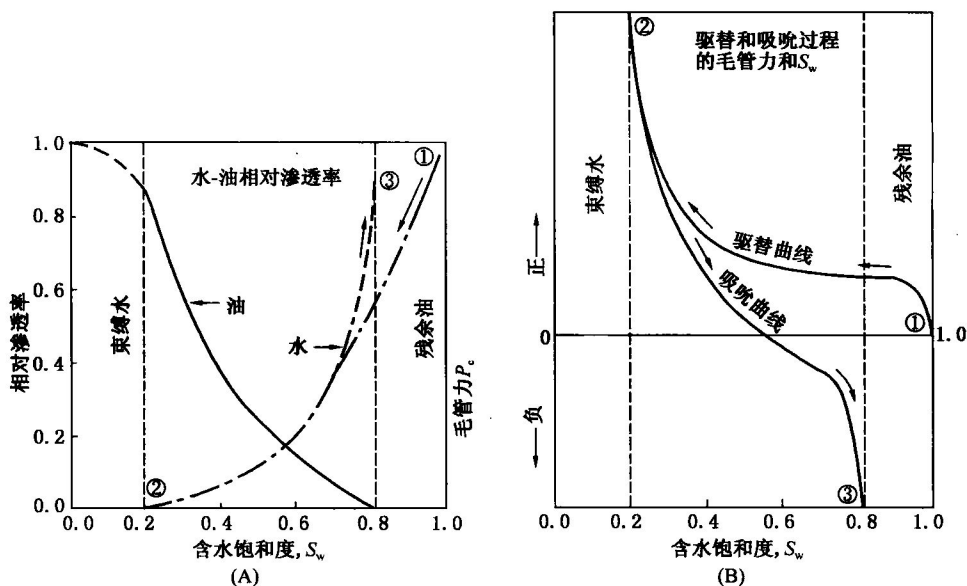


图 1-4 相对渗透率和毛细管压力与水饱和度的关系

早期认为, 润湿性与相对渗透率曲线相关 (见图 1-5B)。亲水岩石比亲油岩石具有更高的束缚水饱和度及较低的残余油饱和度。在残余油饱和度情况下, 亲油岩石的水相相对渗透率 (K_{rw}) 较高。因此, 储层中流体在亲水岩石和亲油岩石中的流动情况有所不同。

最后一个重要参数是毛细管压力。毛细管压力是控制流体流经孔隙的能力。毛管压力和吸吮饱和度 (润湿相饱和度增加)、驱替水饱和度 (润湿相饱和度降低) 之间的关系曲线称为

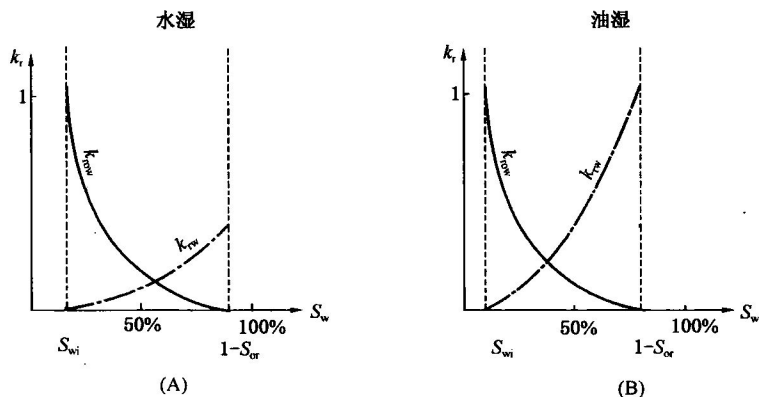


图 1-5 润湿性对相对渗透率曲线的影响

毛管压力曲线，用来评估储层的水饱和度（见图 1-4B）。通常，毛管压力曲线是不可逆的，存在着滞后现象。（更多信息可参见 Cosse, 1988）。

（三）压力和温度

压力和温度取决于埋藏深度和地质史两个参数。采用电缆测试工具测定压力，并在井底安装测量仪测定地层温度。覆盖地层压力是流体压力（FP）和颗粒压力之和（见图 1-6）。

通常覆盖地层压力的变化梯度是 23kPa/m，流体压力因流体性质和化学组分不同而不同。典型地，水相的流体压力梯度是 10.2kPa/m，油相的流体压力梯度是 7.9kPa/m，气相的流体压力梯度是 1.8kPa/m。由于水相、气相和油相中的压力梯度不同，因此油气藏不同深度的压力不同（见图 1-7），但流体压力也可能因温度或地质条件的变化而发生变化。

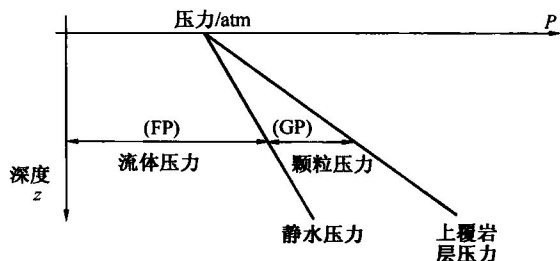


图 1-6 盖层压力（流体压力和颗粒压力之和）

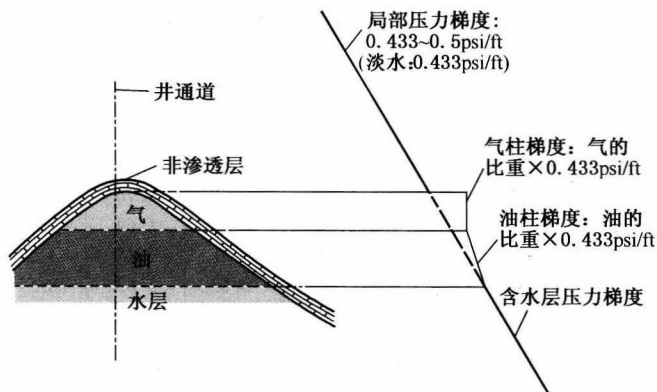


图 1-7 地层压力在油藏结构中的分布

三、油气流体

（一）油气流体的组分

油气流体依据其组分在不同温度中的流动性不同而进行划分。在一个特定的油气藏中，

往往存在着从干气到沥青质的连续光谱。但在深层的高温、高压区域,由于热裂解而导致光谱明显减弱。

油气流体主要含烃类物质,简述如下。

烷烃,最简单的烷烃是甲烷,氢原子被甲基取代而生成其他烷烃。烷烃有两种结构,即直链烷烃和支链烷烃。直链烷烃在非生物降解石油中大量存在,因此是色谱分析的重要标记物。

环烷烃,包括饱和环烷烃及其衍生物。最简单的环烷烃是环戊烷和环己烷,通过烷基取代作用,可获得环戊烷和环己烷的异构体。储层流体中也含有大量的多环烷烃。

芳香烃,至少含有一个苯环。甲苯、二甲苯和异丙苯等烷基苯已被人们所熟知,储层流体中也含有大量的多环芳香烃。芳香烃具有较好的水溶性,其在蓄水层中的浓度与地下矿床有关。

含有 100 个以上碳原子及具有更复杂结构的芳香烃称之为胶质、沥青质。这些复杂的结构反映了干酪根衍变为烃的过程。

地球化学家利用一些残留在原始有机质中的组分推测油气流体的演化过程,并将其与烃源岩联系在一起。尽管卞啉是化石的重要标记物,却很少被地球化学家所采用,相反地,类异戊二烯、甾烷、藿烷被用来系统、定量地分析油气流体的性质。

通常这些生物标记化合物也用来评估原油的生物降解水平。目前地球化学研究很难判定原始有机质的影响、沉积过程中氧化作用的影响、不断上升的温度的影响和迁移条件与最终的改造、混合机制之间的关系。部分特殊的生物标记物能够指示特定的衍变过程,这就需要地球化学家具有敏锐的洞察力,能够利用小部分样品深入研究整个石油体系。

(二) 典型组分

油气流体是由干酪根经热化学过程衍变而来,因此流体组分反映了流体的沉积环境。流体在迁移过程中会留下一些组分,但其他的原始参数不会发生变化,造成气、液相分离或热重分离。另一方面,生物降解改变流体组分,致使油气流体难以识别。

表 1-2 是 5 种气体和 5 种原油的成分表。每种气体或原油的某一组分的摩尔含量是一定的,比如 $C_6 \sim C_{10}$ 的原油组分包含了 6~10 个碳的所有烃。通常气体富含轻烃组分(主要是甲烷),而原油包含 $C_1 \sim C_{49}$ 的烃。

表 1-2 5 种气体(G1~G5)和 5 种原油(O1~O5)的成分

气或油	组 分 摩 尔 含 量									
	N ₂	CO ₂	C ₁	C ₂	C ₃₋₅	C ₆₋₁₀	C ₁₁₋₁₃	C ₁₄₋₂₄	C ₂₅₋₄₉	C ₅₀₊
G1	2.55	3.61	83.48	4.99	3.75	1.52	0.04	0.04	0.01	0.00
G2	1.33	3.82	81.79	5.33	4.77	2.58	0.21	0.16	0.01	0.00
G3	0.86	2.34	76.11	8.45	7.09	3.52	0.76	0.73	0.14	0.00
G4	0.66	1.72	73.89	7.87	7.68	4.58	1.64	1.60	0.34	0.02
G5	0.83	1.80	60.57	9.40	10.35	8.20	3.15	4.11	1.46	0.13
O1	0.52	1.95	47.36	7.23	12.12	12.63	5.63	8.51	3.48	0.57
O2	0.46	0.84	33.80	5.33	11.68	15.47	10.18	14.30	6.50	1.46
O3	0.37	1.06	14.91	3.03	10.22	18.42	8.99	20.52	15.01	7.47
O4	0.43	0.32	4.73	0.31	2.27	15.77	19.46	36.47	16.84	3.40
O5	0.28	1.76	3.15	0.29	5.19	19.68	12.32	23.30	26.29	7.74

(三) 储层流体性质

第一个性质是采出液中油、气的相对含量和油相的密度。在油气井测试中,溶解气油比通过计量分离器测定。计量分离器的测量条件因储层环境和流体流动速率的变化而变化。实际上,油从分离器流到油库油罐时,气体会逸出,原油中含油量和含气量均会减少。在油田

生产中,常用平均生产气油比来描述流体性质,它与分离流程密切相关。

原油密度反映了原油质量及其经济价值,通常采用美国石油学会(API)制定的标准代替原油密度。

$$API = \frac{141.5}{S_g} - 131.5$$

S_g 是标准值,是原油在标准条件下(15℃, 100kPa)的密度。API 值越高,表明原油越轻,原油的经济价值越高。API 为 40°的原油称为轻质油,而 API 为 10°及以下的原油称为重质原油,比如布伦特原油的 API 为 38.3°,常用来作为原油性质的标准。

(四) 储层流体的分类

按照流体在不同储层温度下的流动性不同对储层流体进行分类。如图 1-8 所示,在压力-温度图中,相包络线的位置与代表原始储层条件的点和代表计量分离器测试条件的点相关。泡点压力是液体出现第一个气泡时的压力,当储层压力比泡点压力大时,该储层原油被认为是不饱和原油。如果储层压力等于泡点压力,该储层原油属于饱和原油。对气体而言,我们可以将气体划分为凝析气、湿气和干气。凝析

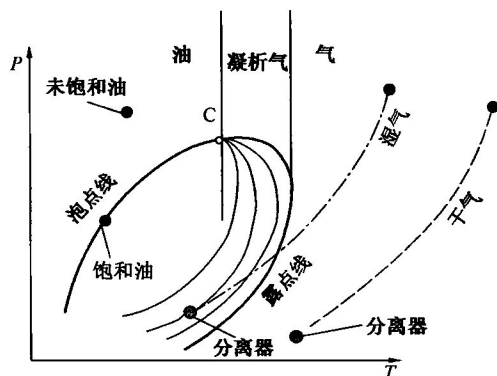


图 1-8 不同类型油和气的压力-温度图

气由凝析油在储层中沉积而成,干气湿气的比值取决于地表下的凝析气藏。储层流体可根据成分分析和地表下原油的特性进行细分。含有 H_2S 和 CO_2 的天然气称为酸性天然气。

四、采油机理

石油开采划分为 3 个典型阶段:一次采油是依靠油藏能量进行自喷开采;二次采油是通过注入水或气体,增大油藏压力,开采出更多石油。三次采油是采用多种方法和技术,改善油藏物性,提高采收率。

(一) 一次采油

石油开采取决于油藏的规模 and 特性,最初油藏压力高,油和气能够自喷到地表;随着油藏压力降低,油井底部与地表的压差很低,只能采用机械采油的方法(如在井底安装泵)增加石油开采量。

在石油开采过程中,整个油藏压力会逐渐降低。开井时压力下降会影响油气流体的流动情况。油气藏包括了 4 部分:①原油及其溶解气;②气顶油和和气顶气;③原油和含水层的水;④含水层的油、水和气顶气。由此,采油机理主要有溶解气驱,气顶膨胀和含水层水驱。溶解气驱是当油藏压力下降到泡点压力时,油相中的轻烃组分逸散到气相。气顶膨胀是油藏压力下降而导致气顶气体膨胀。含水层水驱是含水层膨胀慢慢推动原油开采,从而保持油藏压力。但在某些情况下,水层无法推动油流体,因此油藏压力迅速降低。

当油藏压力下降得很低,导致产率太低或开采出的水或气含量太高时,一次采油阶段就会结束。通常,一次采油只能采出 10% 的原油(方法描述见图 1-9)。

(二) 二次采油

向油藏中注入气或水有两个目的:维持油藏压力及推动原油流向采油井。通常,水被注

入到含水层，而气被注入到气顶层(见图1-10)。但一般情况下，注入的流体分布于整个油田，在注入井周围形成一个流体带。当二次注入时，含水带不断扩大，导致采油井水窜，采出液中的含水量增加，部分原油被水驱动。通常，二次采油能采出15%~60%的原油，而确切的采收率取决于储层原油的性质、油藏的特性以及油井的数量和布井方式。

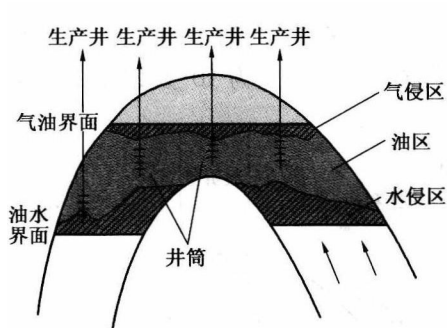


图1-9 油气流体自喷到采油井

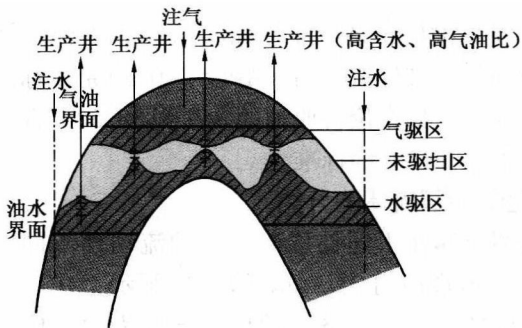


图1-10 在含水层注入水或气顶层注入气体

(三) 三次采油

三次采油采用更尖端的技术，被称为提高采收率技术(EOR)。该技术包括提高采收率机理的研究和开采技术的更新。提高采收率的目标是改善原油的流动性和被驱动性，提高原油的采收率。尖端技术包括油井的改善、设备的改善以及油藏特征的优化。这些技术不断更新，然而提高采收率机理的研究仍没有大的突破。

(四) 提高采收率

提高采收率(EOR)机理包括4种方法：热力法、化学法、混相法和微生物法。

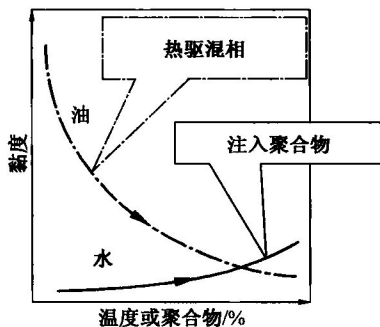


图1-11 注入聚合物或采用热力法对原油黏度的影响

热力法是世界上提高采收率技术最常用的方法。热力法分为两种方法：注蒸汽法和地下燃烧法。事实上，温度越高，原油黏度越低，因此热力法的原理是通过改变地层温度而降低原油黏度(见图1-11)。

注蒸汽法是向油层中注入一定压力和温度的饱和蒸汽，蒸汽的配比取决于油藏及原油的性质，包括蒸汽驱、蒸汽吞吐和蒸汽辅助重力泄油技术。蒸汽驱是将蒸汽注入到垂直井中，把原油驱向生产井采出。蒸汽吞吐是先向油井注入一定量的蒸汽，关井一段时间，待蒸汽的热能向油层扩散后，再开井开采。蒸汽辅助重力泄油是一种有效开采沥青质超稠油油藏的方法，将蒸汽注入到采油井上方的水平井中，形成蒸汽腔。在重力的作用下，

被加热的原油流向注入井下方的生产井采出。地下燃烧法是向油藏中注入空气，使原油和空气一起燃烧。燃烧是一个放热过程，致使油藏温度升高，而原油的黏度降低，该方法主要在美国使用。

化学法是向油藏中注入聚合物、表面活性剂或碱。注入聚合物可以增加水的黏度(见图1-11)，改善流度比 M ：

$$M = \frac{kr_{inj}}{\mu_{inj}} \times \frac{\mu_{oil}}{kr_{oil}}$$

其中 kr_{inj} 是注入相的相对渗透率, kr_{oil} 是油相的相对渗透率, μ_{oil} 、 μ_{inj} 分别表示油相和注入相的黏度。

注入表面活性剂可以减小毛管力, 而毛管力能够限制注入水的微观驱替效率。事实上, 残余油的驱替是各种力和毛管力相互竞争的结果, 可以用毛管数表示。只有当毛细管力下降引起临界毛管数降低时, 原油才能被表面活性剂所驱替, 残余油越容易被驱替, 则残余油的饱和度 (S_{orw}) 越低 (见图 1-12)。

在这些条件下, 油水混相驱替效果将明显增加。向油层中注入碱性物质, 有利于改变润湿性, 降低油、水界面张力。碱-表面活性剂-聚合物驱融合 3 种化学物质的驱油优势 (Tabert 等, 1996), 但化学提高采收率法成本高, 只能运用于特殊油藏 (油藏温度和盐浓度不太高), 且随时间推移, 化学物质会降解而导致驱油效率降低。

混相驱是指通过注入一种能与原油混相的流体来排驱残余油, 可以大大降低原油和注入流体之间的界面张力。混相气体能够降低残余油的饱和度, 改变渗透曲线的形状 (见图 1-12)。原油流动性越强, 采收率越高。当界面张力下降至临界值时, 相对渗透率曲线会发生变化。界面张力临界值取决于流体和岩石的性质, 但该值通常为 $0.1 \sim 1 \text{ mN/m}$ 。注入的混合气体, 可以是干气, 也可以是湿气, 这取决于油和气的性质, 混合气体的比例可以通过蒸发气驱或浓缩气驱而获得 (Morel, 1991)。二氧化碳与其他气体相比, 具有较低的混相压力。注入二氧化碳引起膨胀效应, 能够增加原油饱和度、原油相对渗透率及原油流动性。二氧化碳气驱可以降低原油黏度, 但也存在潜在的破坏力。二氧化碳可破坏沥青质的稳定性, 导致沥青质在储层、地面设备或管道中沉积, 从而引起堵塞问题 (Klins 和 Bardon, 1991)。

微生物提高采收率将在第 11 章详细阐述。

提高采收率技术越来越重要, 其中一些方法具有应用前景, 但往往受到一些因素限制, 比如生产成本、气体的来源和温室气体的排放。显而易见的是, 即使一种方法能够在小范围内显著提高采收率, 但在复杂的油藏条件下, 其作用效果会大大降低。

以上部分, 我们回顾了油藏特征及生产机理的基本概念。下面, 我们将介绍原油如何从储层被举升到地表。

五、钻井和地面设施

(一) 钻井

钻井可以将油气流体从油藏提升至地表。早期, 油井都是垂直钻探 (见图 1-13, 井 B)。后来通过控制钻井轨迹, 可以钻探水平井 (见图 1-13, 井 A), 现在即使更复杂的分支井也能钻探, 且钻探深度超过 6km , 整个井身长度超过 12km 。

在钻井过程中, 泥浆充满井筒, 能够保持井底充足的压力, 避免井喷。泥浆可分为水基泥浆和油基泥浆, 其密度和流变性因混合成分 (蒙脱土/聚合物) 的不同而改变。泥浆进入油层后会降低油层渗透性, 降低油井产量, 因此钻井过程中应避免泥浆进入油层。另外, 一种新技术——欠平衡钻井, 能够使泥浆压力略小于油藏压力。

油井的钻探分为几个阶段, 直径从最初的 26in 降低至 7in 。每一阶段油井内都下入相应

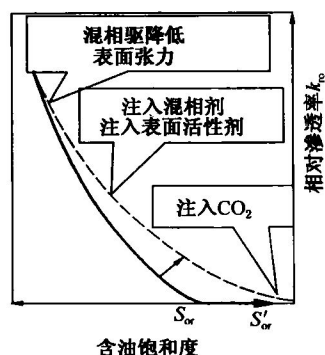


图 1-12 提高采收率技术的其他机制及其对相对渗透率曲线的影响

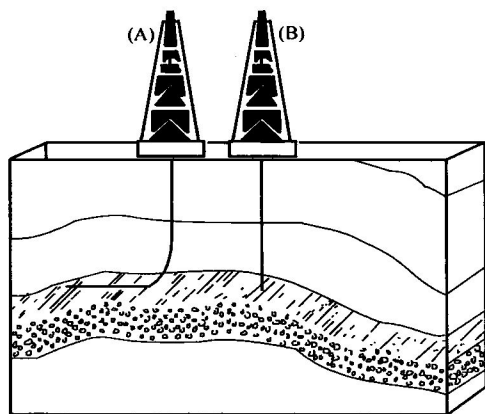


图 1-13 两种油井：水平井(A)和直井(B)

采出液处理分为 3 个阶段，首先利用一个或多个分离器将采出液分离，分离器的级数由井口压力决定。井口压力越高，需要的分离器越多，确保贮存或运输过程中具有适当的大气压（图 1-15 是连续分离装置图，图 1-16 是分离器剖面图）；然后对原油进行脱硫处理；最后脱水、脱盐处理。采出的气体经过处理后，压缩运输；采出水经过处理后，可回注或排入海里。

六、水的问题

采油需要消耗大量的水，同时也会采出大量的水。在油田开采寿命终止时，采油井含水率高达 98%，即每立方米采出液中仅含有 0.02m^3 原油。采出水的盐浓度可能很高，并含有部分有毒物质和大量的烃类物质，因此在外排或回注油藏前必须经过处理。

（一）采出水特征

油井采出水具有以下特征：①不含溶解氧；②温度高（ $40 \sim 90^\circ\text{C}$ ）；③含少量悬浮颗粒，盐浓度最高达 300g/L （盐酸盐、硫酸盐或碳酸盐）；④含不同浓度、不同性质的多种烃组分及醇类或酚类物质；⑤含有金属（锌、铅或铜）、酸、有机物质和氮、磷等成分。

（二）水处理

依据用途不同，采出水的处理方法不同，如对于外排到海或河里的水及回注到油藏的水而言，二者的处理方法不一样。

1. 外排

排放前必须经过脱油处理，排放标准是采出水中原油含量不超过 $5 \sim 40\text{mg/L}$ 。

2. 回注

采出水回注具有生态意义，同时可节约水资源。但注入水的需求量大于回注水量，因此需要混入其他水源，这就涉及不同水源之间的配伍性问题。

的套管。

井筒是原油从油藏流入采油井的通道，在预计的油层深度，采用射孔方式穿透套管，并穿进储层岩石约 1m ，压裂能促使围岩破裂而提高采收率，酸化能够溶解围岩，尤其是那些碳酸盐围岩。水平井一般采用悬挂筛管或割缝衬管方式完井，可以防止地层坍塌或产生泥砂（见图 1-14）。

（二）地面设施

建立地面设施的目的是根据不同油气的集输需求，对采出液进行处理。原油运输方式（油船或管道）不同，则具体的处理过程不同。

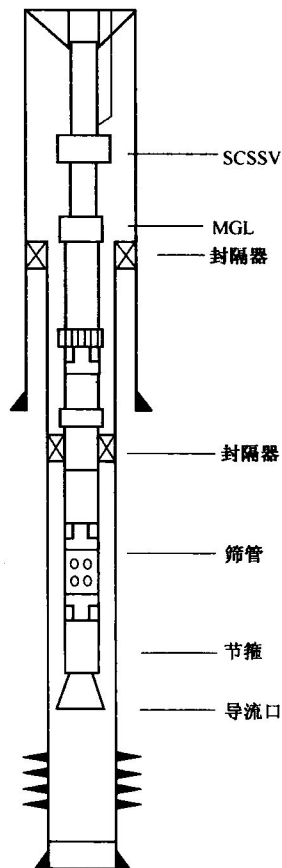


图 1-14 采油井示意图

SCSSV 是地面安全阀；MGL 是气举操作阀；封隔器起分隔作用；射孔段能改善油井采收率；部分举升装置采用泵代替气举阀

注入水处理需要根据储集层性质遵循不同的标准：一般水中固含量低于 5mg/L ，固形物直径小于 $2\mu\text{m}$ （或 $5\mu\text{m}$ ）；氧含量低于 $0.02\sim 0.03\text{mg/L}$ ，避免发生腐蚀；使用杀菌剂杀灭微生物；防止沉积和矿物质引起的腐蚀问题。注入水应当避免与岩石或油层水形成沉淀。水处理过程取决于水的来源：地下水、采出水和地表水（见图1-17）。

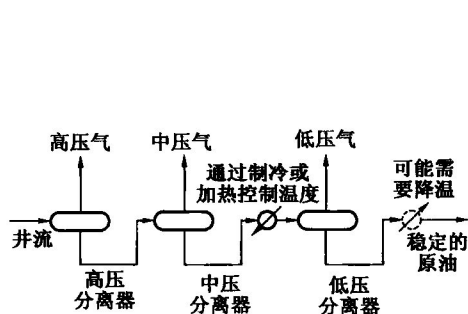


图 1-15 从高压到低压的 3 个分离阶段

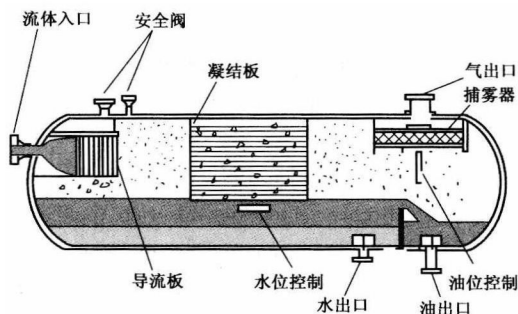


图 1-16 三相分离器剖面图

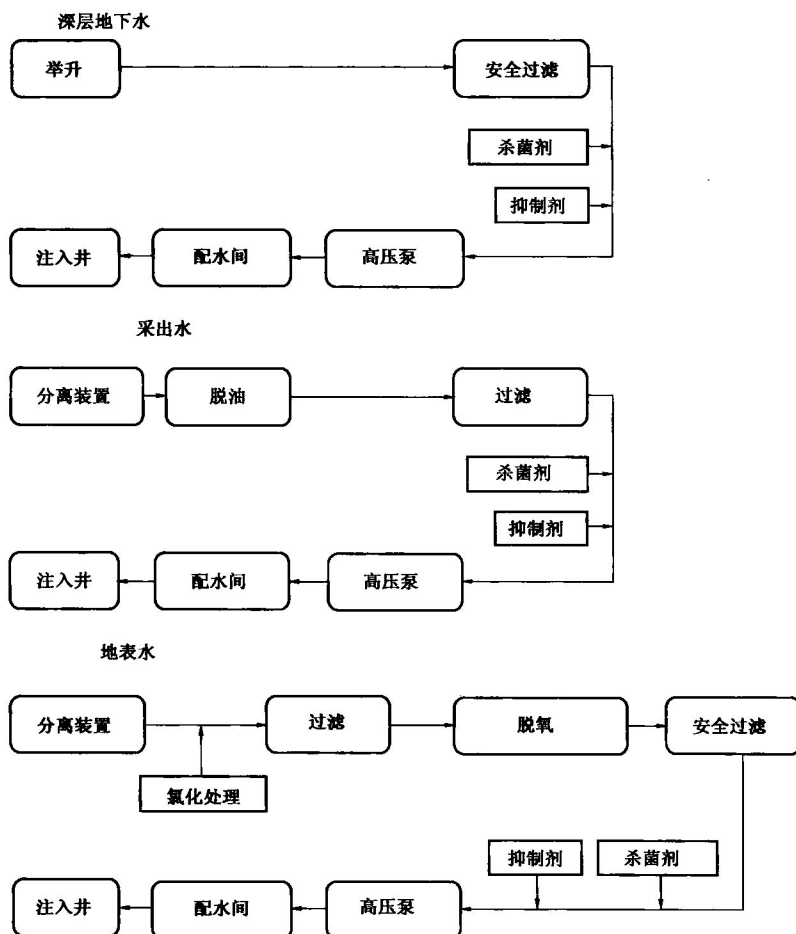


图 1-17 回注前对 3 种不同类型的水源进行处理

七、结论

油田的发现和开采是一个复杂的过程，从发现油田到石油开采（油或气）结束，需要不

同领域的人员共同参与,才能确保获得最大收益。油田的开发使油藏环境越来越复杂和恶劣,原油开采难度越来越大(如黏度更高)。因此,油田的开发需要引入更多的技术和理论知识。

参 考 文 献

- Cossé, R. 1988. Le gisement. Institut Français du Pétrole and Technip Editions, Paris, France
- Gravier, J. F. 1986. Propriétés des fluides de gisements. Cours de production, vol. 2. Technip Editions, Paris, France
- Klins, M. A., and C. P. Bardon. 1991. Carbon dioxide flooding, p. 215 ~ 239. In M. Baviere (ed.), Basic Concepts in Enhanced Oil Recovery Processes. Elsevier Applied Science, London, United Kingdom
- Marie, C. M. 1991. Oil entrapment and mobilization, p. 3 ~ 39. In M. Baviere (ed.), Basic Concepts in Enhanced Oil Recovery Processes. Elsevier Applied Science, London, United Kingdom
- Morel, D. 1991. Miscible gas flooding, p. 185 ~ 214. In M. Baviere (ed.), Basic Concepts in Enhanced Oil Recovery Processes. Elsevier Applied Science, London, United Kingdom
- Tabert, J. J., D. Martin, and R. S. Seright. 1996. EOR screening criteria revisited. SPE/DOE 35385. In Proceedings of the SPE/DOE Tenth Symposium on Improved Oil Recovery. Society of Petroleum Engineers, Richardson, Tex