

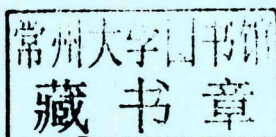
特低渗透油藏 微米尺度毛细管渗流界面特征

李安琪 武平仓 著

石油工业出版社

特低渗透油藏 微米尺度毛细管渗流界面特征

李安琪 武平仓 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书以长庆油田特低渗透油藏为典型代表,通过理论分析、实验测试和分子动力学模拟,系统阐述了微米尺度毛细管中水驱油和气驱油所涉及的固—液界面、液—液界面、气—液界面的运动特征,探讨了特低渗透油藏中毛细管压力变化的微观机理,对特低渗透油藏开发和提高采收率具有指导意义和参考价值。

本书可供从事油气田开发的生产、研究人员参考,也可作为物理化学研究领域研究人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

特低渗透油藏微米尺度毛细管渗流界面特征/李安琪,武平仓著.

北京:石油工业出版社,2014.9

ISBN 978-7-5183-0231-4

I. 特…

II. ①李…②武…

III. 低渗透油层-油气藏渗流力学-研究

IV. TE312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 143535 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) 64523562 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2014年9月第1版-2014年9月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:9.75

字数:225千字

定价:50.00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

PREFACE

提高石油采收率是油田开发永恒的主题, 存在于其中的本质过程, 即多孔介质内多相流体的流动一直是工程流体力学渗流研究的重点。目前, 研究人员针对多孔介质内多相流体的分布和饱和度, 多孔介质毛细管压力与流体饱和度的关系, 多孔介质内流体的渗透率等宏观性质已开展了大量的研究。但是, 对于特低渗透油藏, 由于多孔介质微观形貌的尺度和复杂性, 以及流体运动的不可观察性, 微米级多孔介质内流体流动遵循的物理规律和相关数学描述至今依然停留在数值模拟阶段, 因此建立研究微米尺度介质内流体流动规律的可视化实验方法就显得至关重要。

本书从微米尺度圆管中不相溶流体互相驱替的基本规律 Washburn 方程出发, 建立了直接观察微米级毛细管中不相溶流体界面运动的可视化实验方法, 将描述两相流体驱替 (液—液、液—气) 的经典 Washburn 理论拓展到三相体系 (液—液—气), 系统研究了微米尺度毛细管管径尺寸、管壁润湿性、液体组成和气体种类对流体界面运动的影响, 讨论了毛细管内多相流体界面运动的规律。

全书共分 8 章, 第一章简述研究多孔介质中流体界面运动的进展; 第二章阐述毛细管中流体界面运动的基本理论; 第三章介绍微米级毛细管中流体界面运动的可视化装置的构建; 第四、第五章介绍微米尺度毛细管中两相流体相互驱替的规律; 第六章介绍微米级毛细管中三相不相溶流体界面运动规律; 第七章介绍多管束微米级毛细管中多相流体界面的运动; 第八章介绍毛细管中不相溶流体互驱的分子动力学模拟。

武汉大学胶体与界面科学实验室董金凤教授对本书的编写提供了巨大的帮助, 在此表示衷心感谢。

由于笔者水平有限, 本书难免有不妥和疏漏之处, 敬请读者批评指正。

目 录

CONTENTS

第一章 绪论	(1)
第一节 多孔介质内流体驱替行为的研究进展	(1)
第二节 毛细管内多相流体界面运动行为研究	(12)
参考文献	(18)
第二章 毛细管中多相界面运动的理论基础	(28)
第一节 黏性流体流动的基本规律	(28)
第二节 毛细管中气—液两相流体界面运动的理论基础	(30)
第三节 毛细管中液—液两相流体界面运动的理论基础	(33)
第四节 毛细管中液—液—气三相流体界面运动的理论基础	(35)
第五节 本章小结	(42)
参考文献	(43)
第三章 毛细管中多相界面运动的装置	(45)
第一节 毛细管中多相界面运动装置的构建原理	(45)
第二节 毛细管中多相界面运动装置的基本性能	(47)
第三节 本章小结	(49)
参考文献	(49)
第四章 毛细管中气—液两相驱替过程界面运动特性	(50)
第一节 毛细管管径大小对气—液驱替过程界面运动特性的影响	(50)
第二节 毛细管表面润湿性对气—液驱替过程界面运动特性的影响	(53)
第三节 本章小结	(55)
参考文献	(55)

第五章 毛细管中液—液两相驱替过程界面运动特性	(56)
第一节 毛细管管径对液—液驱替过程界面运动特性的影响	(56)
第二节 毛细管管壁润湿性对液—液驱替过程界面运动特性的影响	(60)
第三节 水—油两相黏度比对液—液驱替过程界面运动特性的影响	(62)
第四节 本章小结	(68)
参考文献	(69)
第六章 毛细管中液—液—气三相驱替过程界面运动特性	(71)
第一节 油—水—气三相驱替过程界面运动特性	(71)
第二节 水—油—气三相驱替过程界面运动特性	(74)
第三节 毛细管管径对液—液—气三相驱替过程界面运动特性的影响	(77)
第四节 毛细管管壁润湿性对液—液—气三相驱替过程界面运动特性的影响	(87)
第五节 本章小结	(91)
参考文献	(91)
第七章 多管束毛细管中气—液和液—液两相界面运动特性	(93)
第一节 毛细管管径分布对液—液两相界面运动特性的影响	(93)
第二节 管束数对液—液两相界面运动特性的影响	(96)
第三节 本章小结	(98)
参考文献	(99)
第八章 毛细管中气—液和液—液两相界面运动的分子动力学模拟	(100)
第一节 计算机模拟方法概述	(100)
第二节 毛细管中液体自发吸入及自发退出过程的模拟研究	(109)
第三节 受外力驱动的毛细管中两相驱替过程的模拟研究	(128)
第四节 本章小结	(145)
参考文献	(147)

第一章 绪 论

自然界中的多孔介质既包括天然的储油层和含水层，也包括生物体中的血液流动系统和各器官组织。前者中的如何提高储油层中原油采收率以及对含水层进行污染治理与保护是当前能源与环境两大主题中亟待解决的重点和难点；后者中的生命系统与环境之间质量与热量传输的定量化研究是生物科学技术进步的重要标志。本质上讲，这些实践和生命过程中都涉及多孔介质内多相流体的驱替行为。

目前，多相流体在多孔介质内的分布和饱和度、多孔介质毛细管压力与流体饱和度的关系、流体在多孔介质内的渗透率等都是工程流体渗流研究者研究的重点和热点。而在生物传热学研究中，Wulff 模型应用体积平均血流率的 Darcy 定量导出血流项，将人体组织看作是多孔介质，把整个系统当作两相流系统。在过去 100 多年的探索过程中，网络模型、管束模型和 Lattice - Boltzmann 方法等被用于模拟多相流体在多孔介质内的流动。其中，管束模型中的单根毛细管内流体驱替行为被广泛地用于对微观流体中毛细管作用的研究。毛细管流体也逐渐由气、液两相流体发展至液-液两相，甚至液-液-气三相，其核心的基础——Washburn 方程及相关理论也得到了相应的发展。

第一节 多孔介质内流体驱替行为的研究进展

一、相关概念及研究进展

1. 流体与多孔介质^[1]

自然界的物质性质是由其微观结构形式所决定的，而自然界中物质的聚集形态不外乎固体、液体、气体和等离子体 4 种，其中，气体和液体一般被统称为流体，例如，水、石油、酒精、空气等都是典型的流体。庄礼贤等人给出了流体一个更加确切的定义，即流体是一种具有流动性的变形体，“当对它施加外力时，不论该外力如何小，它总会发生变形，并且将不断地继续变形下去”^[2]。而流体的连续不断变形则被称为流体的流动。

在自然界中，流体的流动大多发生在多孔介质中。例如，地下水和油气在岩石孔隙中运动，污水在砂过滤器中流动等。Bear 等人在 1968 年就给出了多孔介质比较完整的定义^[3]：多孔介质是含有固相的多相系，固相部分称为固体骨架，其他相可以是液相和（或）气相；除固相部分以外称为孔隙空间或空隙空间；固相遍布整个多孔介质，具有较大的比面积，而构成孔隙空间的孔隙比较狭窄；孔隙中许多孔洞相互连通。在水文地质、工程地质、土工建筑、农田水利、环境保护和油田开发等领域存

在大量的多孔介质，其中被广泛研究的有石油工程学中的储油层与地下水文学中的含水层。

储油层或储气层是一种在其孔隙中除含水以外至少还含有一种液相或气相碳氢化合物（石油或天然气）的多孔地层。根据解释碳氢化合物成因问题的有机成因论，作为有机物质（动物和植物）分解产物的碳氢化合物是从过去地质时期生存的有机体演变而来的，富含能够产生碳氢化合物的有机物质的地层叫做生油层。在生油层中产生的碳氢化合物形成了大量的、被充满孔隙空间的水所包围的小泡，这些小泡在浮托力和毛细管压力作用下，从生油层向储油层运移和聚集。这样，在储油层内部，密度较小的流体处于储油层的较高位置。此外，毛细管压力使润湿流体向含有非润湿流体的孔隙中流动，其结果是抵消了重力对流体分离的作用^[5]。因此，在平衡条件下，储油层中碳氢化合物的分布较为复杂；如图 1-1 所示，在水和油以及油和气之间都存在过渡带，石油带中含有少量水（同生水）。

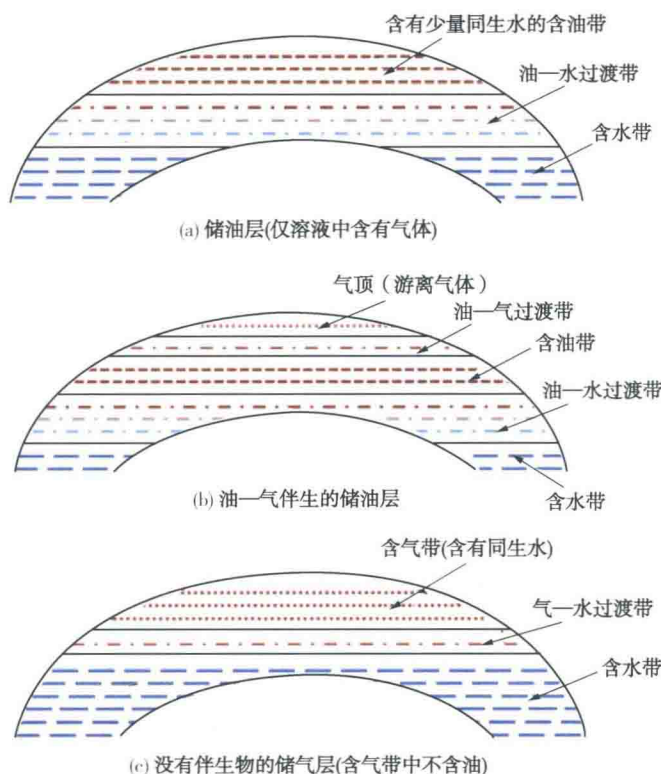


图 1-1 储油层中碳氢化合物的 3 种典型分布^[4]

图 1-2 给出了地面以下水的分布。通常，地面以下所有的水都被统称为地下水。然而，由于地下水水文工作者主要研究饱和带中的水（饱和带因其全部孔隙充满水而得此称谓），所以他们利用地下水这个术语表示饱和带中的水。在农田排水及农艺学中，该术语还表示潜水面以上充气带中的水；由于充气带中同时包含着气体（主要为空气和水蒸气）和水，因此，充气带也被称为不饱和带。含水层（即地下水盆地）则必须具有两种性质：（1）含有水；（2）在一般的野外条件下允许大量的水在其中流动。阻水层与之相反，虽然它可以含水，甚至大量含水，但在一般野外条件下不能大量导水，如图 1-2 中的毛细管带就属于阻水层。毛细管带自潜面向上扩展，

其含水量随着距潜水面的高度增加而逐渐减小。在毛细管带中,压力小于大气压力,水可以发生水平或者垂直流动。当潜水面以下饱和带的厚度比毛细管带的厚度大得多时,通常忽略毛细管带中的流动。但在许多排水问题中,研究非饱和带中的流动同样具有重要意义。

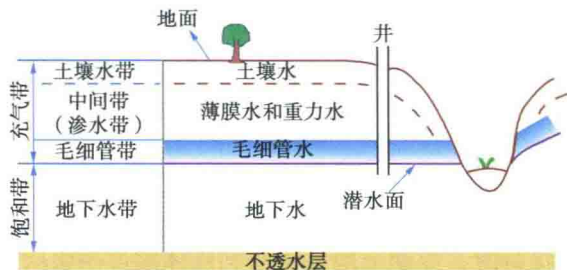


图 1-2 地面以下水的分布

2. 流体的饱和度^[6]

多孔介质的孔隙空间可全部被一种液体充满,也可部分地为一种流体所充满,而剩下的孔隙空间则为空气或者某种气体所占据,或者由两种甚至 3 种不互溶的液体共同充满。在这些情形下,探讨被某种流体占据多少孔隙空间的问题是十分必要的。通常用多孔介质中某一特定流体的饱和度来定义被该流体充满的此介质孔隙的体积分数。这样,用 S_i 表示对流体 i 的饱和度,则饱和度可表示为:

$$S_i = \frac{\text{介质中流体的体积}}{\text{介质中孔隙的总体积}} \quad (1-1)$$

而对共同充满孔隙空间的两种流体 w 和 nw 来说,则有:

$$S_w + S_{nw} = 1 \quad (1-2)$$

对于 3 种不互溶的流体共存的情况,也有类似的关系。可见,饱和度是一个无关流体在多孔介质孔隙空间中相对分布的整体性质,同时是一个无量纲量。目前,以下几种方法被广泛地用于测量多孔介质内流体的饱和度:

(1) 体积平衡法:如果一已知孔隙度的多孔材料在初始时不含流体 w ,把此流体的一个体积 V_w 引入此材料,则饱和度可根据体积守恒直接计算;反之,如果此多孔材料的样品初始时为此流体所饱和,取出一个体积 V_w ,则可应用类似的做法。

(2) 直接称量:当多孔介质被两种互不相溶的流体共同饱和时,各流体的饱和度可通过直接称量确定。

(3) 电阻法:如果多孔材料是电流的不良导体,当材料的孔隙空间被良导体流体(如氯化钠溶液)部分充满时,则此流体的饱和度可通过测量电阻加以确定。此法在岩样各处流体的饱和度相对均匀一致以及称重是不现实或不可能的情况下特别适用。

(4) X 射线吸收法^[7,8]:如果多孔介质被两种互不相溶的流体共同饱和,而其中一种流体含有 X 射线良吸收体的溶解盐,则可由此样品的 X 射线总吸收系数得到该流体饱和度的变化,即 X 射线吸收能力可被换算成饱和度。

3. 流体的界面张力和毛细管压力^[6,9]

当两种互不相溶的流体(分别设为流体 1 和流体 2)相互接触时,在两液体之间存在着一个压力间断,它取决于两种液体之间界面的张力和分界面的曲率。将该压力间断称为毛细管压力,其用 p_c 表示,其值用 Laplace 方程给出:

$$p_c = \gamma_{12} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) \quad (1-3)$$

式中, γ_{12} 为流体 1 和流体 2 之间的界面张力, mN/m ; r 和 r' 是两种流体之间界面上两个相互正交的主曲率半径。

对在一个卷曲起来的固体表面 (如毛细管) 内部相接触的两种不互溶流体来说, 流体一界面的界面与固体表面相交的角度称为接触角 (θ)。接触角的大小由 Young 方程^[10] 决定:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{s1} - \gamma_{s2}}{\gamma_{12}} \quad (1-4)$$

式中, γ_{s1} 、 γ_{s2} 分别为流体 1、流体 2 和固体之间的界面张力, mN/m 。

当液体与气体相接触时, 界面上的分子受到液体内部的吸引力与其受到来自气体内部分子的吸引力不平衡, 最终合力的方向与界面垂直并指向液体内部。在合力的作用下, 表层中液体分子趋于向液体内部收缩, 液面上的分子尽可能地压向液体内部, 使液体具有尽可能缩小其表面的趋势, 这样, 沿着液体表面便产生了表面张力。由此可见, 分子间的吸引力使得在液体的表面上能够承受一定的张力, 这个张力就是表面张力。表面张力通常发生在液体与气体相接触的界面上; 若此张力发生在液体与固体或不同的两种液体相接触的界面上, 则常称为界面张力。在此, 为方便起见, 将不相溶、不相同两相间的张力统称为界面张力, 如式 (1-3) 和式 (1-4) 中的 γ_{12} 、 γ_{s1} 和 γ_{s2} 。

界面张力的大小与液体的温度、纯度、性质及其接触的介质有关。例如, 当式 (1-4) 中 $\gamma_{s1} > \gamma_{s2}$ 时, 则 $\cos \theta > 0$, θ 为锐角, 说明流体 1 相对于流体 2 来说更能润湿此固体; 反之亦然。当把流体 1 引至某个充满流体 2 的多孔材料表面时, 若 $\gamma_{s1} > \gamma_{s2}$, 则流体 1 倾向于沿着孔壁自发地渗入而驱替流体 2, 也就是说润湿流体由于渗吸作用而驱替非润湿流体; 润湿流体倾向于首先进入并且充满最小的孔隙, 然后逐步在能满足式 (1-3) 和式 (1-4) 最大曲率的所有孔隙中累积, 直至达到平衡。

4. 毛细管压力—饱和度的关系^[11]

从毛细管压力产生的机理可以看出, 毛细管压力对流体之间驱替行为的影响或促进或阻碍, 因此, 对多孔介质内毛细管压力的认知非常必要。在多孔介质内, 毛细管压力定义如下:

$$p_{nw} - p_w = p_c(S_w) \quad (1-5)$$

式中, p_w 和 p_{nw} 分别表示润湿流体和非润湿流体中的压力。

非润湿流体相较于润湿流体压力所超出的量则为毛细管压力。研究认为, 多孔介质的毛细管压力为润湿相饱和度 S_w 的函数。

在传热传质领域, Dhir 和 Catton^[12] 在研究加热颗粒床 (Heated Particulate Beds) 中的干燥热通量 (Dryout Heat Fluxes) 时就曾考虑过毛细管压力—饱和度 (p_c-S) 关系。Bau 和 Torrance^[13] 在研究低渗透多孔材料内的沸腾现象时也曾考虑过毛细管作用。对多孔介质内毛细管压力—饱和度 (p_c-S) 关系的确定历来被认为是石油采收领域重要的研究方向; 而它的确定首先通常需要确定待研究的未经开采的储层内流体的分布。此外, 毛细管压力—饱和度关系在建立不饱和土壤中非水相污染物迁移的数学模型中的应用也受到了一定的关注^[14]。

70年前, Leverett 为不同的渗透率和孔隙度的松散沙土(即非固结材料)建立了著名的毛细管压力和饱和度的半经验关系^[15]。当时,所用的测量方法为重力法。该方法为将待研究的非固结材料填充于一个垂直管中,并用非润湿流体饱和,然后将垂直管的下端浸没在装有润湿流体的容器中。设容器中液面的高度为零,自此点到某高度的距离为 z ,在任意高度 z 处,两种流体的压力满足以下公式:

$$p_w(z) = p_w(0) - \rho_w gz \quad (1-6)$$

$$p_{nw}(z) = p_{nw}(0) - \rho_{nw} gz \quad (1-7)$$

式中, ρ_w 、 ρ_{nw} 分别为润湿流体和非润湿流体的质量密度; g 是重力加速度。

在经过足够长的时间后,体系达到水静力平衡时,式(1-6)和式(1-7)必定成立。

由式(1-6)和式(1-7)可得到:

$$p_c(z) = p_c(0) + (\rho_w - \rho_{nw})gz \quad (1-8)$$

由于 $z=0$ 处,介质完全被非润湿流体饱和,则有:

$$p_c(0) = 0 \quad (1-9)$$

此时,式(1-8)可以写为:

$$p_c(z) = (\rho_w - \rho_{nw})gz \quad (1-10)$$

建立平衡,得到 $p_c(z)$ 后,再通过确定饱和度方法确定润湿流体的饱和度,这样,毛细管压力—饱和度的关系就被确立了。除了重力法之外,还有驱替法和离心机法被用于毛细管压力—饱和度关系的确定。

驱替法是将多孔介质先用润湿流体饱和,然后把此多孔介质放在一个充满非润湿流体的容器中;容器的底表面是一块只容许润湿流体通过的半渗透板,半渗透板外接一个刻度管,在刻度管中能够读出润湿流体被驱替出来的量,这样通过调节非润湿流体的压力 p_{nw} 并使之稳定,体系到达平衡时,就可以测出 S_w , 且 p_w 保持在一个大气压,这样就可以得到 p_c — S_w 关系曲线。

离心机法和驱替法类似,但须满足润湿流体的密度比非润湿流体的密度要大。首先也是将多孔介质用润湿流体饱和,再把多孔介质放置在一个装有非润湿流体的杯形装置中,然后把整个体系置于离心机上,在一系列设定的旋转角速度下,润湿流体由于密度较大而从外径排出,而非润湿流体从内径处进入多孔介质。这样,在恒定的旋转角速度下,达到饱和度的平衡分布。此分布由该介质的毛细管压力—饱和度关系的特性所决定^[16,17]。利用牛顿第二定律对旋转体系进行受力分析,可推导出以下公式:

$$\overline{S_w} p_{cl} = \int_0^{p_{cl}} S_w(p_c) dp_c \quad (1-11)$$

式中, $\overline{S_w}$ 是润湿流体中的平均饱和度; p_{cl} 是样品内径处的毛细管压力,可通过式(1-12)求取。

$$p_{cl} = \frac{\Delta\rho\omega^2}{2}(r_2^2 - r_1^2) \quad (1-12)$$

式中, $\Delta\rho$ 是润湿流体与非润湿流体之间的密度差; ω 是离心机的旋转角速度; r_1 和 r_2 分别为样品旋转的内、外半径。

将式(1-11)微分得:

$$\overline{S_w} + p_{cl} \frac{d\overline{S_w}}{dp_{cl}} = S_w(p_{cl}) \quad (1-13)$$

式(1-13)中的 $\overline{S_w}$ 可被测得, p_{cl} 也可由式(1-12)求得,然后从 $\overline{S_w}$ 对 p_{cl} 的曲线中估算 $\frac{d\overline{S_w}}{dp_{cl}}$ 值,再把这些结果代入式(1-13)中,便得到 $S_w(p_{cl})$,从而可得到 $p_{cl}-S_w$ 图。

5. 毛细管滞后现象^[6]

从前面毛细管压力的测定方法中可以发现,待研究的样品在初始时或是被润湿流体饱和,或是被非润湿流体饱和,而这些方法在任意一种初始状态下均可运用。然而,初始状态不同会导致得到的毛细管压力—饱和度曲线也不同,这种现象被称为毛细管滞后现象。

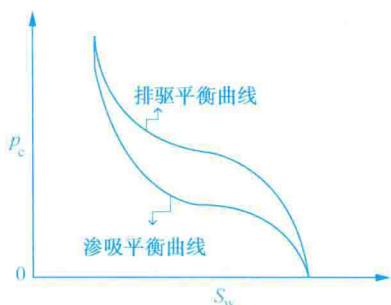


图1-3 毛细管压力—饱和度的标准平衡曲线^[18]

测量从被润湿流体所饱和的样品开始而得到的毛细管压力—饱和度曲线称为排驱(Drainage)曲线;反之,测量从被非润湿流体所饱和的样品开始而得到的曲线称为渗吸(Imbibition)曲线。如图1-3所示,通常在给定的毛细管压力下,排驱曲线上对应的饱和度要比渗吸曲线上的饱和度要高;而且,在给定的饱和度下,排驱曲线上对应的毛细管压力也比渗吸曲线上的毛细管压力要高。

这种差异是由流体间界面的前进接触角和后退接触角的不同造成的。究其原因,可概括为以下3点:

一是由于饱和顺序不同(即初始饱和状态不同)而造成的,可称为润湿伤害的毛细管滞后现象。特别是对于天然原油—盐水体来说,由于原油中活性物质在固体介质上的吸附,多孔介质的润湿性常常会随着时间而发生变化^[19-22]。比如,把用挥发性的溶剂彻底清洗过的岩石样品浸没在原油中一段时间后,它将表现为油湿;但若把它清洗后暴露于盐水中,则它又表现为水湿^[23]。润湿性的不同也就造成了前进和后退接触角的不同。类似地,有机化学物质对地下多相污染体系的润湿性和毛细管压力也有类似的影响^[24]。

二是由于孔隙喉道的突变和渐变造成的,也就是岩石孔隙结构研究中所谓的“墨水瓶”效应^[25]。

三是由于孔隙的断面变化和管壁粗糙造成的;van Duijn 和 Chaouche 等人分别在一维和三维的多孔介质中进行过相关的实验研究,前者关注不均匀表面对润湿流体的捕获对毛细管压力的影响,后者则研究孔隙的不均匀导致渗透率发生巨大改变时,排驱曲线与渗透率的关系,其结果与基于宏观描述的数值模拟相吻合^[26,27]。

此外,毛细管压力—饱和度的曲线不仅能用于预测互不相溶的流体在多孔介质中的空间分布,而且还能体现在渗吸或排驱过程中体系能量的变化和外界功的作用。在液—气或者油—水两相驱替过程中,渗吸曲线下方的面积代表渗吸过程中体系能量的释放大小,而排驱曲线下方的面积则代表排驱过程中为了驱替润湿流体外界做功的多少^[18,28]。研究还发现,水湿性、部分润湿和油湿的介质内,其渗吸和排驱过程中毛细管压力的变化也大不一样^[28-30]。因此,在不同润湿性的多孔介质中的工程应用过程中,功和能的效用也不一样。Anderson 研究发现,石墨、煤块、硫黄、云母(滑



石), 类似滑石的硅酸盐及很多硫化物的润湿性都很可能处于中度润湿性到油湿性之间; 而常见的含水层构成物质, 如石英、碳酸盐和硫酸盐都是强水湿性的^[31], 即使是原本水湿性的多孔介质也会由于极性化合物的吸附或者有机物的沉积, 而发生润湿性的转变^[32,33]。因此, 在实际的采油生产和环境污染防治的工作中, 应首先考察土壤和地质的物性, 并研究毛细管压力—饱和度关系, 这样可为实际生产和工程作业的条件选择提供基础的理论指导和依据。

6. 渗流、渗透率和渗透系数^[6,34]

渗流是指流体在多孔介质中的流动, 而流场则是渗流的区域。由于在自然界、工程材料和动植物体内均广泛存在多孔介质, 因此, 渗流可被划分为地下渗流、工程渗流和生物渗流。地下渗流是指土壤和岩石中流体的流动, 如二氧化碳、地下水、地下盐水、地热和油气等; 工程渗流是指各种人工材料和工程装置中流体的流动; 生物渗流是动植物体内流体的运动。

渗透率是用于描述在外加压力梯度的作用下, 某种流体通过多孔介质的难易程度, 即流体传导性的一种参数。当某种黏度为 η 、不可压缩的流体在外加压力梯度作用下水平直线地通过一个长度为 L 、截面积为 A 的多孔介质时, 根据达西定律, 此材料的渗透率 K 可用下式计算出来:

$$K = \frac{q\eta}{A(\Delta p/L)} \quad (1-14)$$

式中, q 是流体的体积流动速度; Δp 是施加于介质两端的压力差; η 为流体的黏度。

从式 (1-14) 中可以推出, 渗透率 K 具有长度平方的量纲。粗略地讲, K 是多孔介质平均孔隙直径平方的一种量度, 仅与介质的骨架性质有关, 如介质的比面、弯曲度、孔隙度和骨架成分等, 因此, K 又可称为多孔介质的内在渗透率。

然而, 流体的渗透性能除了与介质的骨架性质有关外, 还与流体的性质 (如密度、黏滞性等) 有关。一般采用渗透系数 (或称水力传导系数) k 描述多孔介质传导流体的能力:

$$k = \frac{K\rho g}{\eta} \quad (1-15)$$

式中, ρ 为流体的密度; g 是重力加速度; K 是多孔介质的渗透率。

从式 (1-15) 中可以推出, 渗透系数 k 具有长度/时间的量纲, 类似于流速的表达。

在油藏开发中, 为了描述多相流体在岩石中的渗流特征, 引入相渗透率和相对渗透率来表征岩石与流体之间的相互作用。多相流体共存时, 某一相流体在岩石中的通过能力称为该相流体的相渗透率或者有效渗透率, 它不仅与岩石本身性质有关, 还与流体的饱和度有关。为了对比各相流体流动能力, 又引入了相对渗透率的概念。相对渗透率是指多相流体共存时, 每一相流体的有效渗透率与一个基准渗透率的比值, 基准渗透率有空气绝对渗透率、100% 饱和地层水的水测渗透率和束缚水饱和度下油相的渗透率。相对渗透率的概念在工程实际中应用广泛, 并且大量的研究将毛细管压



力、相对渗透率和饱和度三者关系相结合,研究孔隙结构、润湿性和驱替速度等因素对这三者相互关系的影响^[25,35-38],甚至实现三者的原位、同步测量^[39,40]。

二、相关模型和模拟研究

多孔介质内多相流体的流动是一个非常复杂的物理过程,多种流动形式(例如,单纯的气体、气—液和液—液等流动)均可发生,甚至同时发生。由于介质微观形貌的复杂性以及流体运动的不可视性,至今,多孔介质内流体流动基于的物理规律和数学描述并没有完善而达成共识。为了对多孔介质的性质进行准确的描述,人们对研究对象的长度尺寸进行了划分:1~100 μm 为孔隙尺度,1~100cm为岩心样品尺度,而1~100km是储集体尺度。为了在孔隙尺度甚至分子水平上对多孔介质内多相流体流动进行描述和便于理解,人们还建立了相应的模型和模拟方法。

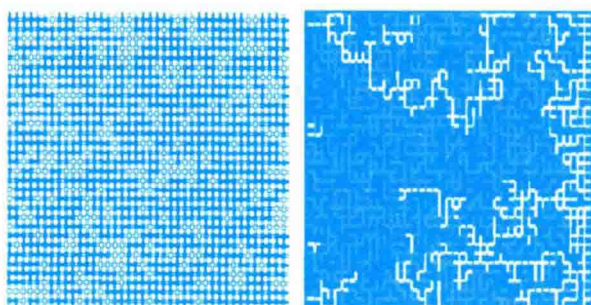
1. 网络模型

20世纪50年代,Fatt首先使用网络模型(Network Model)来描述多孔介质内的多相流动^[41-43]。到20世纪80—90年代,网络模型被广泛地应用于简单或者理想化的多孔介质内不同的流体驱替过程的研究^[25,44-47]。研究对象从单相流体开始引入渗流的概念,研究毛细作用起主导作用的两相渗流行为^[48-51]。另一种极端的两相流动行为就是黏滞力起主导作用的流动,即低黏度流体驱替高黏度流体时发生的孔隙尺度上的黏滞指进现象^[52]。为了能考虑流体黏度与毛细管压力的共同作用(即毛细管数)对流动行为的影响,进而发展了动态的网络模型^[48]。动态网络模型与渗流网络模型的根本区别就在于渗流网络模型假设在同一相流体中压力场是均一的,而动态网络模型则在每个时间步中都计算相应的压力场并用于确定界面运动。Lenormand等人^[44]在此基础上用完全动态的二维模型研究黏度比和毛细管数对排驱过程的影响。随后,动态模型被用于研究渗吸^[53]、低毛细管数强制渗吸^[54]、裂隙介质中的渗吸^[55]、残余油滴动力学的两相流动^[56,57]、两相流动机理^[44]和三相排驱过程^[58]等研究。

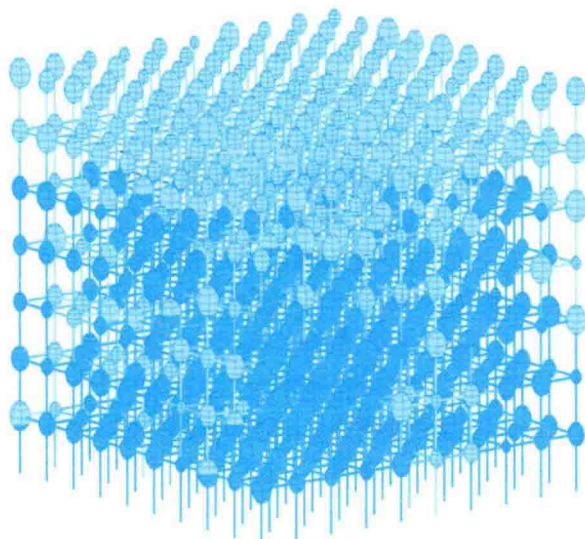
随着计算机技术的发展,三维网络模型也逐渐被应用于流体驱替行为的研究领域中^[59,61]。Celia等人利用三维的网络模型,在孔隙尺度上建立了两相流体排驱和渗吸过程中毛细管压力、饱和度和界面面积之间的函数关系^[62,63]。van Dijke等人则在三维网络模型中建立多个位移链,研究多孔介质内各个孔隙的润湿性都不同时毛细管压力控制的三相驱替行为^[60,64]。图1-4给出了文献中报道的几种典型的网络模型^[59-61]。

2. 管束模型

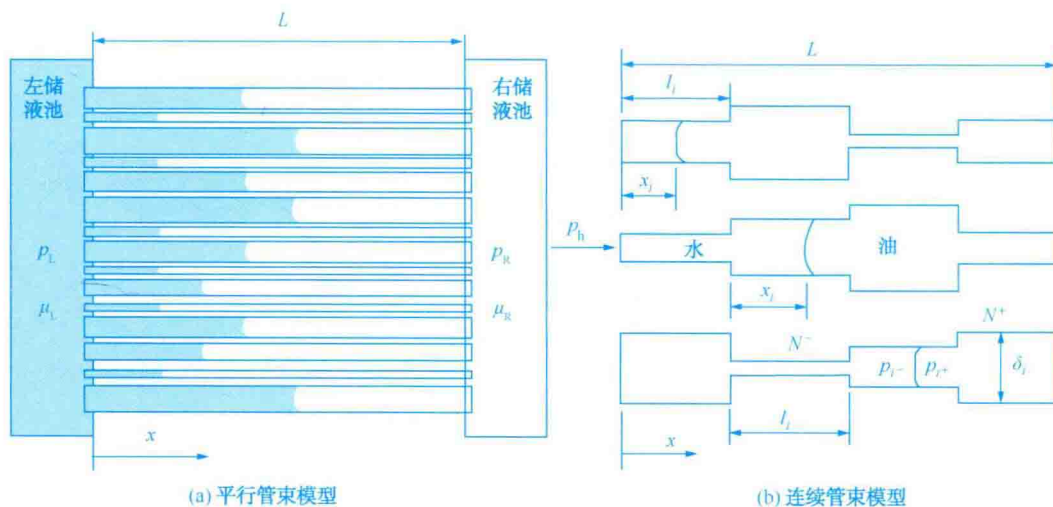
事实上,将多孔介质内的多相驱替模拟成网络模型的意义并不在于试图计算在网络结构中微米尺寸上的流体流动速率,而是为了描述基于已知的流动规律在不同的条件下发生的流型特征。而管束模型则可以精确计算在水驱模式下,随着时间的推移,流体的流速和相界面的位置。典型的管束模型有两种,一种是平行管束模型(Parallel Tube Bundle Model),在此模型中,每根管束的管径是均一的,但不保证所有管束的管径都是一样的^[65],如图1-5(a)所示;另一种则是连续管束模型(Serial Tube Bundle Model),其管径在驱替方向上发生随机或周期性变化^[66],如图1-5(b)所示。



(a) 二维网络模型



(b) 三维网络模型

图 1-4 文献中报道的二维^[59,60]和三维^[61]网络模型

(a) 平行管束模型

(b) 连续管束模型

图 1-5 平行管束模型^[65]和连续管束模型^[66]

早在 20 世纪 50 年代, Scheidegger 就发明了平行管束和连续管束的宏观模型。但是, 他并没有得到相界面位置相关的解析式^[67]。Yuster 也曾使用了管径均一和管径不同的圆柱形管研究油水同时注入时的驱替行为, 模拟了在管径变化的管束中水由于



对管壁较好润湿而形成残余水膜的现象，并观察到了油的相对渗透率对黏度比和润湿相饱和度的依赖关系^[68]。到 20 世纪末，计算机和软件程序的应用使得界面追踪和不相管束模型的流速计算成为可能^[69]。最近，Bartley 和 Ruth 研究得到了用于计算在平行毛细管束和连续毛细管束中互不相溶两相流动的解析式，并将之用于两相相对渗透率的计算^[66,70,71]。研究发现，黏度比对相对渗透率的影响在平行管束模型和连续管束模型中均很显著，并且相对渗透率比的变化趋势与 Singhai 等人^[72]在真实多孔介质中实验的结果一致；并指出，忽略非润湿相平均压力和润湿相平均压力之差（即宏观的毛细管压力），必定会造成不同黏度比的两相流动中相对渗透率的差异。Dahle 等人则利用平行管束模型计算毛细管压力—饱和度之间关系中的动态效应^[73]。在此基础上，Zhang 等人建立起能用于描述平行管束两相驱替的系统平均方程，在动量方程的基础上增加了若干相，使平均方程能用于多孔介质多相流动的描述^[65,74]。

在上述模型中，管束之间是相互独立的，流体的流动也是同方向的（即顺流，Co-current Flow）。为了更贴近多孔介质的真实形貌，多种相互作用的毛细管束模型得以发展。图 1-6（a）中所示的是 Dong 等人在 1997 年报道的一种对流（或者逆流，Counter-current Flow）流型，由于两根毛细管管径的差别，左边的毛细管压力小于右边的毛细管压力，而使油水两相在两根毛细管内发生逆流^[75]。在这种模型基础上，Dong 等人发展了相互作用的毛细管束模型，如图 1-6（b）所示，圆柱形毛细管的半径自上而下逐渐变小，压力的平衡作用也使得不同管束内油水界面的位置相互依赖^[76,77]。近年来，Unsal 课题组使用图 1-6（c）描绘的毛细管间侧面相通的模型^[78]和非轴对称、无相互作用的毛细管束模型^[79]分别研究了自发的顺流和逆流渗吸过程。

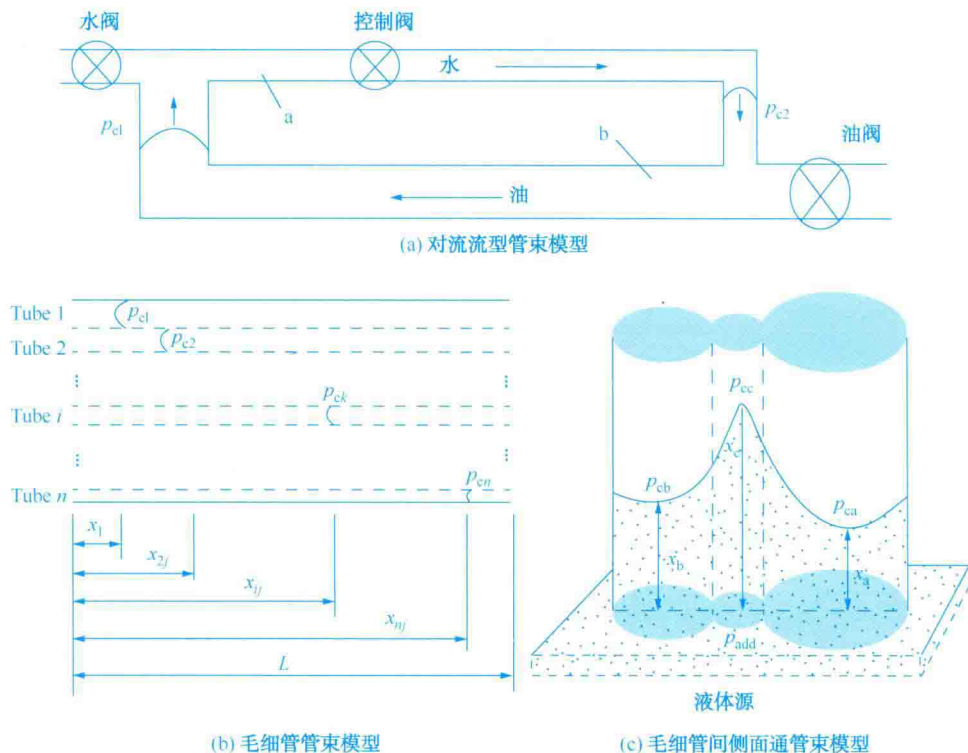


图 1-6 相互作用的管束模型^[75-78]

3. Lattice - Boltzmann 方法

Lattice - Boltzmann 方法是计算流体力学方法之一，它于 1988 年由美国 Los Alamos 国家重点实验室 McNamara 和 Zanetti 教授模拟格子气自动机时首次提出^[80]；相对于仅是对孔道形貌和拓扑结构理想化模拟的网络模型^[81]，Lattice - Boltzmann 方法能直接模拟任何具有复杂几何边界的多孔介质，并且算法简单。为了研究到网络模型无法抵达的死角，Lattice - Boltzmann 模型（以下简称 L - B 模型）逐渐发展并形成了 4 种模拟多孔介质多相体系的模型。

第一种 L - B 模型（RK 模型）是由 Gunstensen 根据 Rothman 和 Keller 的格子气模型^[82]发展而来，用于模拟两相流体^[83]；Gunstensen 用有颜色的粒子表示不同的相，并利用一个扰动步（Perturbation Step）使相间的界面满足 Laplace 方程。随后，Grunau 等人进一步对这种彩色模型进行完善^[84]。然而，它的应用仍存在严重的局限性，原因在于这种模型的建立并不基于热力学，因此很难将微观物理现象与模型相结合^[85,86]。第二种模型是 Shan 和 Chen 将 L - B 方法用于模拟多组分流体时形成的 SC 模型^[87,88]，其应用后被 Shan、Martys 等人进行了拓展^[89-91]。Hou 等人在模拟两相体系中静态的气泡时发现 SC 模型确实比 RK 模型进步很多^[92]，这是由于 SC 模型引入了粒子的相互作用。但是，SC 模型不是完全建立在热力学基础上的，而体系只有在扣除边界影响的条件下，其纯动量才能守恒^[86,89,93]。因此，SC 模型仍需要改进。第三种 L - B 模型是 Swift 将多相流体建立在自由能（Free - Energy, FE）方法上的 FE 模型^[94,95]。此模型弥补了上述两种模型的不足，其体系能保持质量、动量守恒，并考虑了非理想流体的热力学平衡态^[96]。它的主要缺点在于宏观 Navier - Stokes 方程黏滞项中非物质性的非伽利略不变性。人们在不懈努力地发展满足热力学的多相理论时得到了第四种 L - B 模型^[86,97-102]，这种模型克服了前 3 种多相模型的非物质性。最近，Yuan 和 Schaefer 通过改变状态方程，完善了这种模型^[103,104]。

上述模型被用于各种多孔介质内多相流体体系的研究，研究内容包括：模拟互不相溶液滴在孔道内的驱替行为^[105]，两相流体在通过重构的多孔介质时的分散过程^[106]，相对渗透率^[90]、润湿性和流速的影响^[107]，毛细管流体流动的接触线^[108]，模拟残余流体的捕获^[109,110]以及接触角滞后^[111]等。不仅如此，人们还将其应用逐步拓展到三维空间上^[90,109,112-114]，如图 1 - 7 所示。

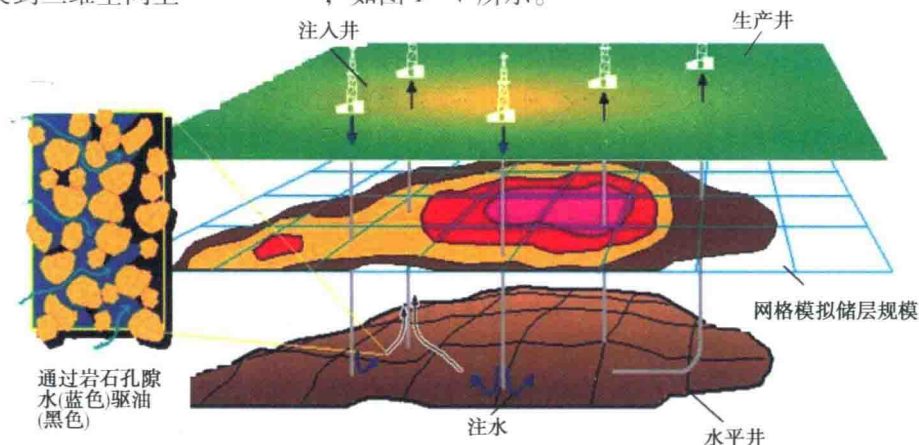


图 1 - 7 Lattice - Boltzmann 方法用于对原油采收率的预测^[109]