

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

现代油藏渗流力学原理(上册)

*The Modern Mechanics of
Fluids Flow in Oil Reservoir*

葛家理 主编

石油工业出版社

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

现代油藏渗流力学原理

**The Modern Mechanics of
Fluids Flow in Oil Reservoir
(上册)**

葛家理 主编

石油工业出版社

内容提要

《现代油藏渗流力学原理》是1999年获北京科技著作奖的“油气层渗流力学”一书的第三版。目前我国及世界上发现了很多特种油气田等待开发(低渗油田、高粘油田、裂缝溶洞油田以及凝析气田等等),这就需要研究特种油田流体的复杂渗流规律。所以本书就以下三个方向做了增新:(1)将现代新兴科学、横断科学与传统渗流力学相集成,以便渗流力学有一个创新发展;(2)全面发展了传统渗流力学的深度和广度(如:单纯介质向变异介质、牛顿液向非牛顿液、单组分向多组分渗流理论的发展);(3)渗流力学理论研究向油田开发实际应用方向发展(如化学驱提高采收率、水平井、分枝井渗流开发理论等)。而且以上新增内容都是作者们近年来科研成果经系统化、规律化后形成的。

本书是教育部2002年最新审订的有关专业(石油天然气、流体力学、地热、地下水工程及各种流体矿藏开发等)研究生教学用书,也可作为广大科技工作者进行科研工作参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

现代油藏渗流力学原理上册/葛家理主编. —3版.

北京:石油工业出版社,2003.2

研究生教学用书

ISBN 7-5021-4063-8

I. 现… II. 葛… III. 油气藏渗流力学

IV. TE312

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第106271号

现代油藏渗流力学原理(上册)

葛家理 主编

出版发行	石油工业出版社出版		
社 址	北京安定门外安华里二区一号楼	邮 编	100011
电 话	010-64202634	传 真	010-64210392
经 销	新华书店北京发行所发行		
排 版	石油工业出版社印刷厂排版		
印 刷	石油工业出版社印刷厂印刷		
开 本	787×1092 1/16	版 次	2003年2月北京第1版
印 数	1—3000	印 次	2003年2月北京第1次印刷
印 张	21.75	书 号	ISBN 7-5021-4063-8/TE·2904
字 数	350千字	定 价	38.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

《现代油藏渗流力学原理》是教育部下发(教研办)字[2002]2号文公布的我国研究生的教学用书,也是1999年获北京科技著作奖的“油气层渗流力学”的第三版。本书在1982年经石油工业出版社作为当时石油部属院校统编教材首次出版以来,经过近18年的使用考验,已经成为各大学高层次人才培养的教材,并为广大科研工作者引用。1999年本书被北京市评为科技进步著作奖,市场上已经销售一空,纷纷要求再版。

但是,针对十几年来渗流力学科研的发展和进步,本书原版只能满足各校本科生的要求,而对博、硕士生培养有创造力人才要求来说,就需加以补充增新内容,而且在科学上还应略有超前,以保证适应21世纪初期教学和科研要求,因此就不能简单再版,于是在2001年我们又将自己多年科研成果增新编入本书第二版,并将书名改为“现代油藏渗流力学原理”。本书已经教育部审订列为2002年我国研究生教学正式用书,现进行第三版再版发行。

本书的特点是:

1. 本书为适应现代科学的发展,增加了新的研究成果,为培养具有创造力人才和创新科研提供基础知识

目前在我国及世界上发现了很多特种油气田等待开发(低渗油田、高粘油田、裂缝溶洞油田以及凝析气田等等),这就需要研究特种油田流体的复杂渗流规律。所以本书就以三个方向做了增新补充:(1)将现代新兴科学、横断科学与传统渗流力学相集成,以便渗流力学有一个创新发展;(2)全面发展了传统渗流力学的深度和广度(如:单纯介质向变异介质、牛顿液向非牛顿液、单组分向多组分渗流理论的发展);(3)渗流力学理论研究向油田开发实际应用方向发展(如化学驱提高采收率、水平井、分枝井渗流开发理论等)。而且这些都是作者们将近年来科研成果经系统化、规律化后编入本书。

2. 本书为力争与国际研究水平相当及预留教材使用空间,尽量保持教科书的使用价值

这些新增内容不但力争与国际研究水平相当,而且都是我国自己的科研成果,所以本身就是有创新性的专著,这样本书将有近5年的提前量,

以保持书籍出版有较长时间的使用价值。

3. 本书为满足不同层次研究生教学的需要,采取了分别对待的措施

本版教科书分上、下两册,完全保持经教育部审订的内容,分为两册是经教育部研究生办公室同意的,目的是上册为硕士生选用,下册则是为博士生选用,以降低学生用书费用(只在个别章的顺序上略有调整)。

为了完成这个目标,作者师生集体(教授、副教授、博士后、博士、硕士生)在“七五”期间,石油部重点科研项目“带溶洞裂隙油藏(即三重介质)渗流规律”研究的基础上,“八五”、“九五”期间,又将裂缝介质渗流研究扩展到稠油、低渗、水平井开发、渗流系统信息辨识、智能布井、分形渗流力学等多方面研究,并将新发展的渗流力学与复杂性科学研究相结合,探索复杂油藏智能开发渗流理论。因此,开展了“863”项目(编号:863-306-102-113)、国家自然科学基金项目(编号:78970046)及国家“八五”攻关项目(编号:85-203-04-04)的综合集成研究。通过研究形成了有关系列论文64篇,并获国家教委(自然科学类)一等奖两次(裂缝油气藏渗流理论及开发分析新方法研究、非线性渗流力学理论应用及推广)及石油部科技进步二等奖(带溶洞裂缝介质渗流规律研究)等。

本书增新部分就是在上述统一目标、统一思路指导下,将长期形成的研究成果、科学论文及研究生学位论文,经过精炼提高、综合集成而形成的。

除主编之外,在第一版中作者尚有朗兆新、赵必荣、翟云芳三位教授,在第二版中尚有栾志安、吴玉树、冯文光、同登科、刘月田、宁正福、曲德斌、周萍、周德华、吴新根、姚约东等博士在攻读学位论文的工作合作成果,在本书第三版教材中尚有涂彬、郭小哲、葛凤龙、刘芳等在编写工作中的协作。特别要提出的是中国科学院渗流所黄延章教授也将科研成果发表在本书第十六章之中,及我国已故渗流力学专家陈钟祥的研究工作在第十一章之中。所以,本书也可以说是全国很多院校(石油大学、西南石油学院、大庆石油学院、中国科学院渗流所、北京石油勘探开发研究院)几代师生的集体研究成果。我们愿将此书献给院校研究生们及广大读者在教学、科研中使用并欢迎批评指正。

目 录

第 1 篇 油气渗流理论基础

第 1 章 绪论	3
§ 1-1 复杂油气田开发和复杂性问题	3
§ 1-2 复杂性问题与复杂性科学	3
§ 1-3 复杂性科学与现代油藏渗流力学	4
第 2 章 油气渗流的基本概念	7
§ 2-1 油气储集层	7
§ 2-2 多孔介质	9
2-2-1 储容性	9
2-2-2 渗透性	10
2-2-3 比表面大	11
2-2-4 孔隙结构复杂	11
§ 2-3 连续介质场	14
2-3-1 连续流体	15
2-3-2 连续多孔介质	18
2-3-3 连续介质场	20
§ 2-4 连续流体的速度和渗流速度	20
第 3 章 油气渗流的基本力学规律	25
§ 3-1 流体及多孔介质的力学性质	25
3-1-1 流体的重力和重力势能	25
3-1-2 流体的质量和质量力(惯性力)	26
3-1-3 流体的粘度及粘滞力	27
3-1-4 岩石及流体的压缩性和弹性力	29
3-1-5 油气层中的表面性质和毛细管力	31
§ 3-2 基本渗流规律——达西定律	32
§ 3-3 非线性渗流规律	36
§ 3-4 在低速下的渗流规律	42
§ 3-5 两相渗流规律	44

3-5-1 毛细管阻力	45
3-5-2 贾敏效应产生的阻力	45
3-5-3 其它方面的附加阻力	46
第4章 油气渗流的基本数学模型	50
§4-1 建立油气渗流数学模型的原则	50
4-1-1 建立数学模型的基础	50
4-1-2 油气渗流数学模型的一般结构	51
4-1-3 建立数学模型的步骤	51
§4-2 状态方程	54
4-2-1 液体的状态方程	54
4-2-2 气体的状态方程	56
4-2-3 岩石的状态方程	57
§4-3 质量守恒方程	58
4-3-1 单相渗流的连续性方程	59
4-3-2 两相渗流的连续性方程	63
§4-4 典型油气渗流数学模型的建立	66
§4-5 数学模型的边界条件	71
4-5-1 给出势的边界条件—给出边界所有点的势	74
4-5-2 给出流动速度的边界条件	74
4-5-3 第三类边界条件	76

第2篇 油气渗流基础理论

第5章 单相液体的稳定渗流理论	81
§5-1 单相液体稳定渗流模型的典型解及其应用	81
5-1-1 单相液体平面平行渗流公式	81
5-1-2 单相液体平面径向渗流公式	84
5-1-3 单相液体球面向心稳定渗流公式	89
§5-2 油井不完善性对渗流的影响	90
5-2-1 油井不完善性的模型	90
5-2-2 油井不完善性对渗流的影响及油井的折算半径	91
§5-3 势的迭加理论和多井干扰	92
5-3-1 多井同时生产的物理现象	92
5-3-2 势的迭加理论	94
5-3-3 渗流速度合成的原则	101
5-3-4 势的速度迭加原则的典型应用	102
§5-4 镜像反映理论和边界效应	108

5-4-1 源汇镜面反映法的物理意义	108
5-4-2 镜像反映理论的基本原理	110
5-4-3 源汇镜面反映法的推广	113
5-4-4 应用反映法求解圆形等势边界地层多井干扰问题	118
第6章 油田开发的等值渗流阻力设计理论	121
§6-1 等值渗流阻力法	121
6-1-1 水电相似原理	121
6-1-2 等值渗流阻力法在多排井上的应用	124
§6-2 油水两相的等值渗流阻力方法	127
6-2-1 确定瞬时产量和井底压力	130
6-2-2 确定开发阶段的平均产量和开发年限	132
§6-3 面积注水时产量和压力的确定	133
6-3-1 直线井排和“切割”井排	133
6-3-2 四点面积注水系统	135
6-3-3 五点面积注水系统	136
6-3-4 九点面积注水系统	136
第7章 弹性可压缩液体的不稳定渗流理论	138
§7-1 弹性不稳定渗流的物理过程	138
7-1-1 水压弹性驱动	138
7-1-2 封闭弹性驱动	141
§7-2 弹性不稳定渗流数学模型无限大地层典型解	142
§7-3 弹性不稳定渗流数学模型有界地层典型解	148
7-3-1 有界封闭地层井以定产量生产时, 液体成平面径向流 压力的变化规律	148
7-3-2 有界定压边界井以定产量投产时, 液体成平面径向流 压力的变化规律	149
§7-4 带时间变量边界条件的不稳定渗流——杜哈美原理	151
7-4-1 杜哈美原理和迭加原理	151
7-4-2 变产量时不稳定渗流的源汇解	153
第8章 气体渗流理论	155
§8-1 气体稳定渗流方程及其典型解	155
8-1-1 服从线性渗流定律的气体单向稳定渗流规律	156
8-1-2 服从线性渗流定律的气体平面径向稳定渗流规律	159
8-1-3 服从非线性渗流定律的气体平面径向稳定渗流	162
§8-2 气体不稳定渗流微分方程的典型解	167
8-2-1 气体不稳定渗流的微分方程及压力函数的应用	167

8-2-2 气体不稳定渗流微分方程的各种典型解	170
第9章 两相渗流的基本理论	175
§9-1 两相渗流数学模型的建立	175
9-1-1 油水两相渗流的数学模型	175
9-1-2 油气两相渗流的数学模型	179
§9-2 考虑重力作用的油水两相渗流	181
§9-3 不考虑毛细管力的油水两相渗流理论	183
9-3-1 油水两相渗流数学模型的基本解	183
9-3-2 非活塞驱替理论	186
9-3-3 油水两相渗流时的压力和产量	190
§9-4 油水两相多维渗流	194
§9-5 油水两相非达西渗流的理论研究	195
9-5-1 忽略毛细管压力油水两相低速渗流的数学模型	196
9-5-2 开发指标计算分析	197
9-5-3 平面径向水驱油两相渗流研究	199
§9-6 油、气两相渗流理论	200
9-6-1 油、气两相渗流的物理过程	200
9-6-2 油、气两相稳定渗流理论	201
9-6-3 油、气两相不稳定渗流理论	206

第3篇 变异介质的渗流理论

第10章 多重介质渗流理论	215
§10-1 三重介质渗流模型	215
§10-2 三重介质渗流问题的精确解及压力动态特征	217
10-2-1 无限大地层问题	217
10-2-2 有界封闭地层问题	219
10-2-3 有界定压力地层问题	222
10-2-4 压力降和压力恢复方程	222
10-2-5 三重介质渗流问题压力动态特征	223
§10-3 定压开采时三重介质不稳定渗流问题的精确解	224
10-3-1 无限大地层问题	224
10-3-2 有界地层问题	226
§10-4 多重介质的渗流模式	228
第11章 双重介质渗流理论	230
§11-1 双重介质单相渗流数学模型的建立	231
11-1-1 运动方程	231

11-1-2 状态方程·····	232
11-1-3 连续性方程·····	232
§ 11-2 双重介质简化渗流模型无限大地层典型解及应用·····	233
11-2-1 $K_2=0$, $\phi_1=0$ 简化模型的典型解·····	233
11-2-2 $K_2=0$ 简化模型无限大地层典型解及应用·····	236
§ 11-3 双重介质简化渗流模型 ($K_2=0$) 有界封闭地层 典型解·····	240
§ 11-4 裂缝—孔隙介质中两相渗流理论·····	244
第 12 章 变形介质渗流理论 ·····	256
§ 12-1 变形介质的渗流规律·····	256
§ 12-2 变形介质稳定渗流的典型解·····	258
§ 12-3 变形介质不稳定渗流典型解·····	259
第 13 章 非均匀介质渗流理论 ·····	262
§ 13-1 非均匀介质地层中概率统计方法的应用·····	262
§ 13-2 非均匀介质中渗流问题的最优化拟合理论·····	267
13-2-1 单相稳定流和不稳定流的 Jacquard 方法·····	268
13-2-2 运用随机理论和线性规划方法求解地层参数拟合问题·····	272
§ 13-3 非均匀介质渗流问题中的随机理论·····	275
13-3-1 非均质油气渗流场的统计特性·····	275
13-3-2 运用随机函数理论求解渗流问题的一般方法·····	280
第 4 篇 复杂流体的渗流理论	
第 14 章 非牛顿液体的渗流理论 ·····	287
§ 14-1 非牛顿液体的流动特性·····	287
14-1-1 定义·····	287
14-1-2 Ostwald - dewaele 幂律模型·····	288
14-1-3 广义达西定律·····	288
14-1-4 非牛顿松弛粘弹性液体不稳定渗流模型·····	289
14-1-5 高分子聚合物的非牛顿特性·····	289
§ 14-2 非牛顿液幂律稳定流动渗流理论·····	291
14-2-1 单向渗流典型解·····	291
14-2-2 非牛顿液体平面径向流典型解·····	292
§ 14-3 非牛顿幂律不稳定渗流·····	293
§ 14-4 双重介质非牛顿幂律液渗流理论·····	294
§ 14-5 分形无限大油藏非牛顿粘弹性不稳定渗流理论·····	298
第 15 章 传质扩散流体的渗流理论 ·····	302

§ 15-1 流体中的水力弥散现象	302
§ 15-2 理想扩散渗流方程的建立	304
15-2-1 扩散方程式	304
15-2-2 带传质扩散渗流的连续性方程	304
15-2-3 一维理想扩散渗流方程	306
§ 15-3 考虑粘度差的互溶液体的扩散理论	309
§ 15-4 带吸附作用的传质扩散理论	312
15-4-1 扩散剂在表面上的吸附过程	312
15-4-2 带吸附现象的扩散方程	313
15-4-3 吸附—扩散方程的求解	315
第 16 章 化学剂驱油物理化学渗流理论	317
§ 16-1 化学驱中的物理化学作用	318
16-1-1 化学剂在多价阳离子水溶液中的沉淀	318
16-1-2 碱剂与极性物质中和反应	318
16-1-3 碱与岩石矿物的化学反应	318
16-1-4 表面活性剂在油水相中的分配	318
16-1-5 化学剂的吸附滞留	319
§ 16-2 复合体系驱油物理化学渗流机理	323
16-2-1 复合体系	323
16-2-2 复合体系驱油渗流机理	324
16-2-3 原油/复合体系中油水乳化和油珠变形	326
§ 16-3 化学剂在多孔介质中的传质扩散修正方程	329
16-3-1 扩散方程	330
16-3-2 对流扩散作用	330
16-3-3 吸附对流扩散的影响实验研究	331
参考文献	338

第 1 篇

油气渗流理论基础

第 1 章 绪 论

§ 1-1 复杂油气田开发和复杂性问题

我国石油开发工业正面临着严重的科技挑战，这就是我国已进入一个复杂油气田开发时期。如果我们科技的基础理论、应用理论、全部工艺技术不能更新换代，那么我国 70% 以上的复杂油气田储量就不能变为现实生产力，我国能源可持续发展战略也就无法实现，因此，发展复杂性油田开发的理论和技术是刻不容缓的。

开发复杂性油气田的难点，归结起来有两方面：一是要研究掌握复杂油气田中流体特有的流动方式和规律，以发展复杂油气田的渗流理论；二是复杂油气田开发所遇到的问题，不只是数量问题、确定问题，而更多的是非数量问题、非确定问题、非透明问题、非有序问题。因此，要提高我们开发复杂油田的水平，就要更新和提高我们认识复杂事物规律的能力，如果我们再能把“复杂油田渗流规律”和“复杂事物认识规律”集成起来形成一个复杂油气田开发渗流理论，这将会大大提高复杂油气田的开发能力。

§ 1-2 复杂性问题与复杂性科学

1. 从前

人们把具有生命一类物质系统认为是“不可思议”、“复杂的”，把“生物系统”与“复杂系统”相联系。

2. 现代

人们接触到物理、化学、社会等非生物系统，认为它们同样有高度“复杂性”，因此，诺贝尔奖金获得者普里高津（Prigogine）说“复杂性不再仅仅属于生物学了，它已进入物理学领域，似乎已经植根于自然法则之中了”，他出版了《探索复杂性》，在《从混沌到有序》一书中提出了“复杂性科学”。

3. “复杂性”是什么

钱学森说：“凡不能用还原法处理的、需要用新科学方法研究的问题都是复杂性问题”，这样定义的原因是，正如耗散结构论创始人普里高津所说的“在本世纪初，物理学继续着经典研究项目的传统，几乎一致认为宇宙基本定理是决定性和可逆性”，所以“简单性”（决定性和可逆性）在人们头脑中扎下了根，排斥复杂性。

4. “复杂性”的科学描述

(1) 复杂性是客观事物的一种属性；(2) 复杂性是客观事物层次之间的跨越；(3) 复杂性是客观事物跨越层次的不能用传统的科学学科理论直接还原的相互关系。

5. 什么是“复杂性科学”

复杂性科学是研究复杂性问题规律，解决复杂性问题方法的科学。

§ 1-3 复杂性科学与现代油藏渗流力学

由毛细管或微毛细管结构组成的介质叫多孔介质。流体通过多孔介质（孔隙介质、裂缝介质和毛细管体系等）的流动叫做渗流。渗流力学就是专门研究渗流的运动形态和运动规律的科学。

渗流力学是流体力学的一个重要分支，又是流体力学和多孔介质理论、表面理论、物理化学、固体力学、生物学交叉渗透的一个边缘学科。

渗流现象普遍存在于自然界中。存在于地层中（如：油气层）称做地下渗流；存在于各种工程技术问题中（化工、冶金、环境保护中的多孔技术的应用）叫做工程渗流；存在于人和动植物体内叫做生物渗流。

由于多孔介质是由微米大小的孔隙所组成，它具有复杂的孔道结构和连通形式、多样的表面性质和很大的比表面，有时还具有显著的弹塑性。因此，多孔介质中的渗流表现出流动阻力大、表面力显著等特点。同时还因为流体的物化性质复杂，渗流过程往往还伴随着物理化学现象的发生。这些特点促使渗流力学逐渐形成一门流体力学的独立分支。它是一个基础学科，同时又有广泛的应用性。

渗流力学是“地下渗流”，也是开发地下流体资源的理论基础。石油、天然气、地下水、地热都存在于多孔介质中（地层中），因此，开发流体矿床必须掌握渗流规律和理论；“工程渗流”是冶金、化工、机

械等部门利用多孔技术的基础,例如,冶金工业中用氩气通过多孔耐火砖进行钢液脱气,化学工业的催化塔,填充床的渗流运动,都是利用多孔介质渗流来改进工艺技术的;“生物渗流”的研究对认识生命活动规律及其控制,具有重要的意义,因为在动植物体内,分布着大量的毛管及微细孔隙,其间的流体流动,如:动物体内的血液流动,矿物质的输送等等都属于渗流范围。由此可见,在实现四个现代化的生产过程和科学实验中,开发油气田、利用地下水及地热资源、水利工程、农业灌溉、土壤改良、生物工程、化工生产、机械、冶金、以及环境保持、地震研究、防止城市沉降等都和渗流力学有着密切的关系。

本书只研究流体在油气藏中的渗流形态和渗流规律,它属于地下渗流的一部分。由于近半个世纪以来,石油及天然气工业有很大发展,使得油气渗流的研究,变为渗流力学最活跃的部分。它的作用已经渗入到油气田开发工作的各个环节。这就有必要将油气藏渗流有关的内容组成一门单独的边缘学科。

石油工作者学习“油藏渗流力学”的目的,是为了把它当作认识油藏、改造油藏的工具,当作油气田开发设计、动态分析、油气井开采、增产工艺、反求地层参数、提高采收率等的理论基础。学习“油藏渗流力学”就要了解这个学科分支的成长过程,存在问题和发展趋势,永远站在科学发展前沿来学习它,应用它和发展它。

渗流力学是一门老而又新的学科。一百多年之前,就发现了古典单相渗流基本规律——达西定律,但它发展成为一门独立学科的分支,还只是近几十年的事。因为生产技术的迅速发展,向渗流力学提出了一系列复杂而又有待解决的问题,同时也发现了渗流力学在定量计算中与实际情况有较大误差的弱点,所以迫切要求进一步深化古典的渗流理论,并用更现代化的新兴科学、横断科学来更新传统的渗流力学的现代化进程。这个现代化的特点和发展趋势是:

1. 出现了研究油气渗流力学带有根本性的新方向

这就是复杂性科学将“复杂油田的渗流规律”与“复杂事物认识规律”集成为一个新的复杂油田开发渗流理论的新方向。

这包括:(1)用智能科学研究油藏渗流力学中的非数量问题;(2)用信息科学辨识理论研究地下渗流黑箱中的非透明问题;(3)用知识可视化理论形象思维科学来研究油藏渗流中的非逻辑思维问题;(4)用分形科学及混沌理论来研究渗流力学中的非有序问题等。

2. 油气渗流理论得到更加深入的发展

这包括：(1) 从单纯介质渗流向变异介质渗流深化（多重介质、变形介质、各向异性介质、分形介质、网络介质等）；(2) 从单组分流体（或牛顿流体）向非牛顿、多组分流体、物理化学流体、非等温流体等的深化。

3. 油气渗流力学得到更广泛应用

这包括：渗流力学在水平井开发应用，在开发低渗油田的应用，在开发裂缝油气田应用，在油田提高采收率方面的应用等等。

因此，本书既是原著“油气层渗流力学”的再版，更是“现代油藏渗流力学原理”新的专著。