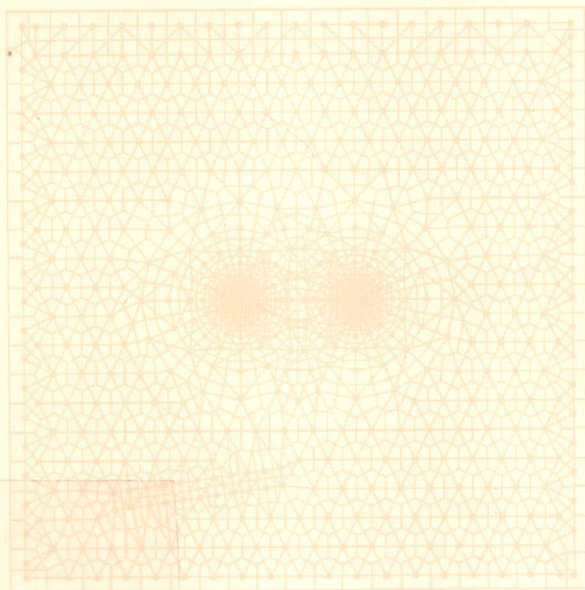


“十一五”国家重点图书 中国科学技术大学精品教材

高等渗流力学

第2版

► 孔祥言 编著



中国科学技术大学出版社



中国科学技术大学精品教材

高等渗流力学

GAODENG SHENLIU LIXUE

第2版

孔祥言 编著

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书是著者多年来在为力学和相关专业以及石油工程专业研究生讲授“高等渗流力学”课程的基础上编辑而成的。内容共分 13 章。第 1、2 章介绍渗流力学的基本概念、基本方程和稳态渗流。第 3~5 章讲述单相液体渗流在不同边界条件和初始条件下的各种解法,包括格林函数法、积分变换法和拉普拉斯变换方法。第 6~9 章分别阐述气体渗流、两种流体界面运动和多相渗流、双重介质中的渗流、非牛顿流体和非达西渗流,其中包括水平井问题、水驱油和注蒸汽采油的数值计算问题、煤层甲烷气渗流等。第 10、11 章研究非线性科学在渗流中的应用,包括多孔介质中的对流及其分叉和分形介质中的渗流。最后两章讨论热流固耦合和数值试井问题,涉及组分模型和黑油模型。书中对渗流问题的物理描述清晰,数学推导严谨。

本书可供油气水开发、环境、地质、化工等诸多领域的教师和研究生、工程技术及研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高等渗流力学/孔祥言编著. —2 版. —合肥:中国科学技术大学出版社,2010. 1
(中国科学技术大学精品教材)

“十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-312-02140-4

I. 高… II. 孔… III. 渗流力学—高等学校—教材 IV. O357.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 009955 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026
网址: <http://press.ustc.edu.cn>
印刷 安徽辉隆农资集团瑞隆印务有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 710 mm×960 mm 1/16
印张 51.75
插页 2
字数 932 千
版次 1999 年 7 月第 1 版 2010 年 1 月第 2 版
印次 2010 年 1 月第 2 次印刷
定价 80.00 元

总序

2008年是中国科学技术大学建校五十周年。为了反映五十年来办学理念 and 特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮、严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列。

1958年学校成立之时,教员大部分都来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又做研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。五十年来,外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中做出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生。这次入选校庆精品教材的绝大部分是本科生基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合”的方针得到进一步

第2版前言

本书第1版问世以来,受到渗流力学同行们的高度关注,并在国家教育部主持的评比中,获“2002年全国普通高等学校优秀教材”二等奖。有许多读者希望本书能继续印刷出版。

考虑到近十年来渗流力学已经有了很大的发展,为适应形势和教学的需要,对本书第1版做了部分修改和增删,在第9章中补充了“低渗透率储层中的渗流”一节,并增加了分形理论在渗流中的应用、流固耦合和热流固耦合以及数值试井三章(第11~13章)。其中第13章“数值试井”中的黑油模型部分由在职博士研究生李道伦同学(现已毕业,任副教授)提供了若干素材,特别是有关混合网格划分的插图以及黑油模型数学方程的离散部分,在此表示感谢。

由于时间紧迫,加之水平有限,难免有若干不足之处,希望广大读者提供宝贵意见和建议,以便在下一次印刷时做进一步修改和补充。

孔祥言

2009年5月于合肥

前 言

渗流力学是流体力学的一个分支,它是多种科学和工程技术的理论基础之一,在 20 世纪受到国际学术界和工程界的高度重视,它的若干领域仍将是 21 世纪力学学科的重要前沿领域。近几年已举办过多次有关多孔材料、渗流理论和数值计算的国际会议。学术论文可谓汗牛充栋,除流体力学刊物中有大量的理论性文章和石油工程、水文学、地质、煤炭、化工等学术刊物中有大量的渗流力学应用论文外,从 1986 年起,由 Kluwer 出版公司出版了专题性杂志《Transport in Porous Media》,至 1998 年已出版了三十多卷。然而,该领域中适合用于多科性理工大学的教科书却是凤毛麟角,本书试图弥补这一不足。

本书是根据著者十几年来为中国科学技术大学力学专业和渗流流体力学研究所的研究生以及某些石油院校石油工程专业的博士生们讲授的“高等渗流力学”课程的内容编辑而成的,是在原有讲义的基础上,经过长期修订、多次增删、反复精炼提高的结果,其中也包含了著者十几年来潜心研究的某些成果。本书着重于渗流力学的理论基础,某些应用范例主要针对石油工程领域。实际上,它在地下水水文学、卫生和环境工程、地质、煤炭、化工以及生物医学工程等领域均有重要的参考价值。

本书的写作力求数学推导严谨,物理描述清晰,尽量做到深入浅出,循序渐进,便于读者掌握其基本要领和深刻内涵。第 1 章介绍了渗流力学的某些基本概念和基本方程。第 2 章讲述稳态渗流。在数学方法上,比较系统地介绍了源函数、格林函数法、积分变换法,以及拉普拉斯变换及其解析反演和数值反演方法,这些是求解各类渗流微分方程的有力工具。在渗流力学中还要用到较多的特殊函数知识。第 3~5 章结合实例论述了这些方法和知识。对于数学物理方法基础较好的读者来说,这三

目次

总序	1
第2版前言	3
前言	5
0 绪论	1
0.1 渗流力学研究的内容及其重要意义	1
0.1.1 地下渗流	1
0.1.2 工程渗流	2
0.1.3 生物渗流	3
0.2 20世纪渗流力学的发展和研究近况	3
0.2.1 物理化学渗流	4
0.2.2 非等温渗流	4
0.2.3 非牛顿流体渗流	5
0.3 对21世纪前期渗流力学理论与应用研究的展望	5
0.3.1 理论、实验和方法研究	6
0.3.2 应用研究	9
1 基本概念和基本方程	11
1.1 引言	11
1.1.1 渗流和渗流力学	11
1.1.2 多孔介质	12
1.1.3 储油层和含水层	15
1.1.4 油藏中驱油方式·二次和三次采油	16
1.2 流体的性质	20
1.2.1 石油流体的组分和相态变化	20

• 8 •

1.9.3 偏微分方程的基本概念及其定解问题	77
2 单相液体的稳态渗流	80
2.1 几种一维流动和二维流动	80
2.1.1 平面平行流	80
2.1.2 平面径向流	81
2.1.3 球形向心流	82
2.1.4 边界上压力分布与角度有关的流动	83
2.2 复变函数理论在单相液体平面稳态渗流中的应用	86
2.2.1 一般分析	86
2.2.2 用复变函数法求解某些简单流动	92
2.2.3 用叠加方法求解	94
2.2.4 用镜像法求解	99
2.2.5 用保角变换法求解	102
2.3 小井群问题	110
2.3.1 双井和四口井	111
2.3.2 五口井和九口井	112
2.3.3 圆周上井排	114
2.3.4 无限长直线供给边界附近小井群	114
2.4 无限井排	115
2.4.1 无限大地层中单一井排	116
2.4.2 直线供给边线附近一平行井排	117
2.4.3 直线供给边线附近双井排·遮挡效应	119
2.5 注水井网·有效传导率	121
2.5.1 引言	121
2.5.2 对正排列的注水井网	122
2.5.3 五点式井网和交错排列井网	125
2.5.4 七点式井网	128
2.5.5 注水井网的电比拟试验	131
2.6 水驱效率	134
2.6.1 对正排列井网直线驱的水驱效率	134
2.6.2 交错排列井网直线驱的水驱效率	136
2.6.3 五点式井网的水驱效率	136

• 10 •

3.6.3 半无限区域的一维流动	189
3.6.4 直角坐标系中的多维流动	191
3.7 圆柱坐标系中的积分变换	194
3.7.1 有限区域的平面径向流	194
3.7.2 无限大区域的平面径向流	196
3.7.3 轴对称的二维流动	197
3.7.4 扇面形区域的二维流动	198
3.8 球坐标系中的积分变换	201
4 源函数、格林函数的应用	203
4.1 瞬时点源和玻耳兹曼变换	203
4.1.1 非稳态平面平行流	204
4.1.2 非稳态平面径向流	205
4.1.3 瞬时点源解	206
4.1.4 等强度持续点源	208
4.2 变强度持续点源	209
4.2.1 变产量的压力降落	210
4.2.2 变产量的压力恢复	213
4.3 无限大地层中源汇分布	214
4.3.1 无限大平面中直线源	214
4.3.2 无限大平面中条带源	215
4.3.3 无限大平面中圆周源	216
4.3.4 无限大平面中圆面源	217
4.4 有直线边界地层中源汇分布	220
4.4.1 条带形地层中直线源	220
4.4.2 条带形地层中条带源	222
4.4.3 基本瞬时源函数表	224
4.5 Newman 乘积法与多维瞬时源函数·格林函数	224
4.5.1 Newman 乘积法	224
4.5.2 分支水平井	228
4.5.3 油藏中瞬时源函数表·格林函数	233
4.6 常规试井分析	234
4.6.1 探测半径和压力扩散	235

5.5.2	物理空间的压力函数	308
5.5.3	井底压力	311
5.6	无限大地层	313
5.6.1	无限大地层中直井的压力	313
5.6.2	无限大地层中直井的现代试井	317
5.6.3	无限大地层中水平井·考虑表皮效应和井筒储集效应	319
5.6.4	无限大地层中水平井的现代试井	321
5.7	Duhamel 定理	325
5.7.1	Duhamel 定理的数学表述	325
5.7.2	Duhamel 定理的证明	327
5.7.3	某些特殊情况下 Duhamel 定理的数学表述	328
5.7.4	Duhamel 定理的应用	331
6	气体渗流理论	334
6.1	天然气的物理特性	334
6.1.1	气体状态方程和偏差因子	335
6.1.2	气体压缩系数、 γ 值和地层体积系数	336
6.1.3	天然气的黏度	338
6.1.4	干气、湿气和反转凝析气	339
6.2	气体渗流方程	341
6.2.1	基本方程	341
6.2.2	气体渗流偏微分方程的一般形式	342
6.2.3	气体渗流的拟压力方程	344
6.2.4	气体渗流偏微分方程的线性化和无量纲化	350
6.2.5	小结	353
6.3	气体稳态渗流	355
6.3.1	平面平行稳态渗流	355
6.3.2	平面径向稳态渗流	356
6.3.3	平面径向非 Darcy 稳态渗流	356
6.4	铅直气井非稳态渗流	358
6.4.1	无限大地层定产量井	358
6.4.2	圆形有界地层中心一口定产量井和定压井	363
6.4.3	几种较复杂情形的解析解	367

7.4.4 面积注水问题	439
7.5 油、气两相和油、气、水三相渗流	441
7.6 相似理论和水驱油的物理模拟	443
7.6.1 模拟实验的理论基础	444
7.6.2 水驱油物理模拟的相似法则	447
7.6.3 原型与模型之间有关量的匹配与换算	453
7.7 注蒸汽采油的数值模拟	455
7.7.1 描述蒸汽驱的微分方程和差分方程	455
7.7.2 差分方程组的隐式处理	460
7.7.3 方程组的解法	464
7.7.4 热损失项的计算	465
8 双重介质中的渗流	466
8.1 基本概念和数学描述	467
8.1.1 裂缝性油藏的特性	467
8.1.2 双重介质中渗流的微分方程	468
8.1.3 双孔隙度和双渗透率问题	469
8.2 双孔介质中的渗流	470
8.2.1 双孔介质中柱源井拟稳态渗流	470
8.2.2 考虑表皮和井储的拟稳态渗流	474
8.2.3 双孔介质中非稳态渗流	476
8.3 双渗介质中的渗流	481
8.3.1 圆形有界地层定压生产情形	482
8.3.2 无限大地层考虑表皮和井储定产量情形	485
8.3.3 无限大双层油藏	490
8.4 多层油藏	498
8.4.1 无限大多层油藏	499
8.4.2 圆形封闭多层油藏	500
8.5 煤层甲烷气渗流	503
8.5.1 煤层和煤层气的有关特性	504
8.5.2 气体的扩散·Fick 定律	509
8.5.3 煤层气运输的数学模型	511
8.5.4 试井分析	513