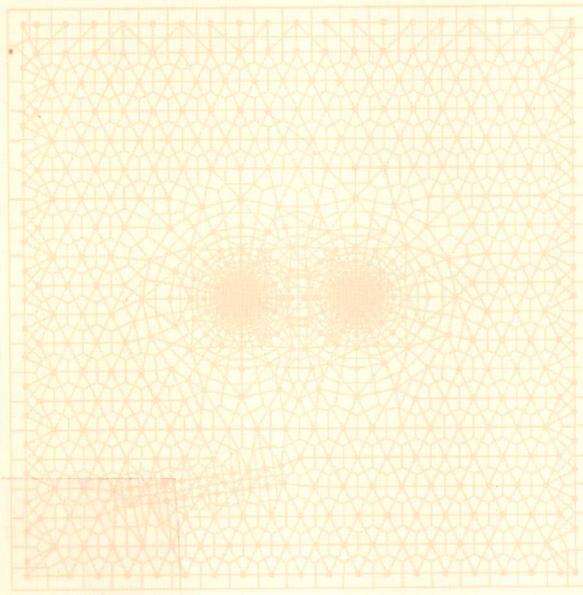


“十一五”国家重点图书 中国科学技术大学教材 精品

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 安徽辉煌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

革故鼎新炼金炉，不凡的会合全将铺就革命前程。果然锻炼非常不辉煌，成就
革命人生路。殊离曲其惊惊裂书，坚贞的正学性受热诚无令僵直，环列师深。
。熙本的长流而暗幽深尝到毛里林立，山林赞誉。
，以林的生学脉络又一脉承传来好教自学者才育得国中
学业生，英伟基墨腾抽长孝孙见之也，承平十五，根深叶茂甲种知深怕日
渐下，甘露润泽此都本是首府盛放枝。士争是非与时事的千变，黑谷味先，未
自得 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
理念和特色，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

深化,取得了非常好的效果,培养的学生得到全社会的认可。这些教学改革影响深远,直到今天仍然受到学生的欢迎,并辐射到其他高校。在入选的精品教材中,这种理念与尝试也都有充分的体现。

中国科学技术大学自建校以来就形成的又一传统是根据学生的特点,用创新的精神编写教材。五十年来,进入我校学习的都是基础扎实、学业优秀、求知欲强、勇于探索和追求的学生,针对他们的具体情况编写教材,才能更加有利于培养他们的创新精神。教师们坚持教学与科研的结合,根据自己的科研体会,借鉴目前国外相关专业有关课程的经验,注意理论与实际应用的结合,基础知识与最新发展的结合,课堂教学与课外实践的结合,精心组织材料、认真编写教材,使学生在掌握扎实的理论基础的同时,了解最新的研究方法,掌握实际应用的技术。

这次入选的 50 种精品教材,既是教学一线教师长期教学积累的成果,也是学校五十年教学传统的体现,反映了中国科学技术大学的教学理念、教学特色和教学改革成果。该系列精品教材的出版,既是向学校 50 周年校庆的献礼,也是对那些在学校发展历史中留下宝贵财富的老一代科学家、教育家的最好纪念。

序 述

2008 年 8 月

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

◎ 著者語 · 渗流力学早被東方學人研究過，但對其深入研究卻是近來的事。要講好對這方面的知識，中章奏效。對少數難解的單相流，要回憶一下過去的知識，並對其進行簡單的重複。單相本章對單相流的討論要帶點相對性，並應將其與多孔流、非均質流、油水兩相流等進行對比。

前 言

譯本基於義寶《浸染一》，但應用中國科學院的中文本，而沒有對原書的其譯文相同。佛羅里德的《浸染》一書有著名的重印，其出處。

滲流力學是流體力學的一個分支，它是多種科學和工程技術的理論基礎之一，在 20 世紀受到國際學術界和工程界的高度重視，它的若干領域仍将是 21 世紀力學學科的重要前沿領域。近几年已舉辦過多次有關多孔材料、滲流理論和數值計算的國際會議。學術論文可謂汗牛充棟，除流體力學刊物中有大量的理論性文章和石油工程、水文學、地質、煤炭、化工等學術刊物中有大量的滲流力學應用論文外，從 1986 年起，由 Kluwer 出版公司出版了專題性雜誌《Transport in Porous Media》，至 1998 年已出版了三十多卷。然而，該領域中適合用于多科性理工大學的教科書却是鳳毛麟角，本書試圖彌補這一不足。

本書是根據著者十幾年來為中國科學技術大學力學專業和滲流流體力學研究所的研究生以及某些石油院校石油工程專業的博士生們講授的“高等滲流力學”課程的內容編輯而成的，是在原有講義的基礎上，經過長期修訂、多次增刪、反復精煉提高的結果，其中也包含了著者十幾年來潛心研究的某些成果。本書着重于滲流力學的理論基礎，某些應用范例主要針對石油工程領域。實際上，它在地下水水文學、衛生和環境工程、地質、煤炭、化工以及生物醫學工程等領域均有重要的參考價值。

本書的寫作力求數學推導嚴謹，物理描述清晰，尽量做到深入淺出，循序漸進，便於讀者掌握其基本要領和深刻內涵。第 1 章介紹了滲流力學的某些基本概念和基本方程。第 2 章講述穩態滲流。在數學方法上，比較系統地介紹了源函數、格林函數法、積分變換法，以及拉普拉斯變換及其解析反演和數值反演方法，這些是求解各類滲流微分方程的有力工具。在滲流力學中還要用到較多的特殊函數知識。第 3~5 章結合實例論述了這些方法和知識。對於數學物理方法基礎較好的讀者來說，這三

章的内容是很容易掌握的。这些可以满足求解单相牛顿流体,包括第6章中气体渗流方程的需要。

为了解决某个较为复杂实际问题,有时单纯依靠解析处理难以奏效,这时通常要借助于物理模拟或数值模拟。本书第7章着重阐述了有关水驱油的物理模拟和注蒸汽采油的数值模拟的有关知识,以求达到抓住本质、举一反三的功效。

在物理描述方面,本书在阐述某个问题时,一般是从定义和基本概念出发,侧重揭示各种流动的物理本质或输运的物理机制,同时讲清其工程背景,建立起物理模型,在此基础上给出其控制方程和定解条件。为了在第1章中使读者不致感到概念过度集中而显得空泛,有关多相渗流、多重介质和分形介质、非牛顿流体渗流和非Darcy渗流等的物理概念在第7~9章中逐步推出。关于非线性科学在渗流力学中的应用,在本书中也占有一定篇幅,其中包括非等温渗流的分叉和混沌、分形几何学在渗流中的应用等。无疑,这些是现代渗流力学的重要内容。在第10章中,着重论述了非线性渗流方程的线性稳定性分析理论,导出其临界瑞利数。在此基础上运用分叉理论给出其分叉结构,并用高精度差分方法和快速傅里叶变换揭示其混沌现象。

本书各章既具有相对独立性,又相互紧密联系。各个章节之间有机结合,环环相扣,构成一个系统严密的整体。本书在力图讲透基础的同时,特别注意反映20世纪末渗流力学发展的最新成果,如有关水平井的渗流、煤层甲烷气的输运机理、双重介质和分形介质中的渗流以及非等温多相渗流和对流传热的稳定性等等。

本校1997级硕士研究生陈国权和几位本科生为本书部分插图做了精心的绘制,并参与参考文献的打印工作,在此表示感谢。本书还存在很多缺点和不足,欢迎提出宝贵意见和建议。

孔祥言

1999年元月

于中国科学技术大学

15	单重味觉评价法	21
22	多孔介质物理参数	22
28	岩石孔隙度、有效孔隙度和毛管孔隙度	28
32	烃类味觉是油性味觉	32
35	预测储层含油性	35
38	奥瑞布纳公式	38.1
40	半透膜平衡系数	40.1
42	对流系数、最大限吸水率和水驱指数	42.1
45	湿润带厚度	45.1
48	总序	48.1
50	第2版前言	3
52	前言	5
53	0 绪论	1
54	0.1 渗流力学研究的内容及其重要意义	1
54	0.1.1 地下渗流	1
58	0.1.2 工程渗流	2
60	0.1.3 生物渗流	3
62	0.2 20世纪渗流力学的发展和研究近况	3
62	0.2.1 物理化学渗流	4
65	0.2.2 非等温渗流	4
68	0.2.3 非牛顿流体渗流	5
69	0.3 对21世纪前期渗流力学理论与应用研究的展望	5
70	0.3.1 理论、实验和方法研究	6
73	0.3.2 应用研究	9
75	1 基本概念和基本方程	11
76	1.1 引言	11
78	1.1.1 渗流和渗流力学	11
80	1.1.2 多孔介质	12
82	1.1.3 储油层和含水层	15
84	1.1.4 油藏中驱油方式·二次和三次采油	16
86	1.2 流体的性质	20
88	1.2.1 石油流体的组分和相态变化	20

1.2.2 流体的密度和重率	21
1.2.3 流体的黏度·溶解油气比	23
1.2.4 流体的压缩系数和热膨胀系数·状态方程	24
1.2.5 原油的地层体积系数	25
1.3 多孔介质的性质	26
1.3.1 多孔介质的孔隙度	26
1.3.2 比面、迂曲度和渗透率	30
1.3.3 多孔介质的压缩系数·状态方程	31
1.4 几个运动学问题	33
1.4.1 渗流速度·Dupuit-Forchheimer 关系式	33
1.4.2 描述流体运动的欧拉观点和拉格朗日观点	34
1.4.3 物理量的物质导数与当地导数	37
1.4.4 源和汇	40
1.5 运动方程	41
1.5.1 Darcy 定律·渗透率	42
1.5.2 Darcy 定律对于流体速度和密度的适用范围	44
1.5.3 Darcy 定律的推广	48
1.5.4 Darcy 定律的推导	50
1.6 连续性方程	53
1.6.1 单相流体渗流的连续性方程	54
1.6.2 油、水两相不溶混渗流的连续性方程	55
1.6.3 油、气、水三相渗流的连续性方程	56
1.7 能量方程	58
1.7.1 热力学和传热学基础	58
1.7.2 非等温渗流能量方程的一般论述	61
1.7.3 单相流体非等温渗流的能量方程	64
1.7.4 油、气、水三相非等温渗流的能量方程	66
1.8 物性方程	67
1.8.1 状态方程	68
1.8.2 本构方程	68
1.9 单相液体等温渗流偏微分方程及其定解条件	70
1.9.1 渗流偏微分方程	71
1.9.2 边界条件和初始条件	74

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

2.6.4 七点式井网的水驱效率	137
2.6.5 注水井网的一般讨论	138
3 分离变量法和积分变换法	140
3.1 分离变量法一般论述	141
3.1.1 基本概念	141
3.1.2 Sturm-Liouville 问题的正交性	142
3.1.3 解的表达式	143
3.2 直角坐标系中的分离变量	144
3.2.1 变量的分离	144
3.2.2 有限区域的一维流动	145
3.2.3 半无限区域的一维流动	148
3.2.4 多维无源汇非稳态渗流	151
3.2.5 多维有源汇非稳态渗流	152
3.3 圆柱坐标系中的分离变量	155
3.3.1 变量的分离	155
3.3.2 贝塞尔方程的特征值问题	157
3.3.3 平面径向流	164
3.3.4 柱坐标系中二维渗流	167
3.4 球坐标系中的分离变量	171
3.4.1 变量的分离	171
3.4.2 勒让德方程和勒让德函数	172
3.4.3 整个球形区域的球对称流动	173
3.4.4 空心球形区域的球对称流动	175
3.5 积分变换法一般论述	176
3.5.1 积分变换对的构造	177
3.5.2 方程和初始条件的变换结果	177
3.5.3 方程的解	180
3.5.4 吉布斯现象	182
3.5.5 积分变换法的求解步骤	182
3.6 直角坐标系中的积分变换	183
3.6.1 有限区域的一维流动	183
3.6.2 有限区域流动解的分解方法	184

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

4.6.2 表皮因子和井筒储集系数	238
4.6.3 定产量压力降落和压力恢复试井	243
4.6.4 由压力降落曲线确定断层的夹角	247
4.6.5 变产量压力降落和压力恢复试井	248
4.6.6 水平井压力降落试井	252
4.7 图版拟合试井解释方法	255
4.7.1 方形地层中铅垂裂缝井	255
4.7.2 无限大地层中有限导流性铅垂裂缝井	257
4.8 解一般渗流方程的格林函数法	261
4.8.1 用格林函数求解的一般理论	261
4.8.2 格林函数的构造方法	265
4.8.3 小结	266
4.9 格林函数法的应用	267
4.9.1 格林函数在直角坐标系中的应用	267
4.9.2 格林函数在圆柱坐标系中的应用	270
5 拉普拉斯变换法	273
5.1 拉普拉斯变换及其性质	273
5.1.1 拉普拉斯变换的定义	273
5.1.2 拉普拉斯变换的主要性质	274
5.2 拉普拉斯变换的解析反演	279
5.2.1 利用拉普拉斯变换表进行反演	279
5.2.2 利用围道积分求原函数	283
5.3 拉普拉斯变换的数值反演	289
5.3.1 Stehfest 方法	290
5.3.2 Crump 方法	291
5.3.3 小结	293
5.4 圆形有界地层中心一口直井	294
5.4.1 外边界封闭情形	294
5.4.2 外边界定压情形	298
5.4.3 平均地层压力	301
5.5 同心圆复合油藏	306
5.5.1 拉普拉斯变换空间的解	306

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、 $\bar{\gamma}$ 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



6.5 水平井气体渗流	369
6.5.1 高压气藏中水平井	369
6.5.2 低压气藏中水平井	373
6.6 气井的产能试井	375
6.6.1 产能分析基本关系式	376
6.6.2 常规产能试井	378
6.6.3 等时产能试井	381
6.6.4 改进的等时产能试井	383
6.7 气井的压力降落和压力恢复试井	384
6.7.1 压力降落常规试井	384
6.7.2 压力恢复常规试井	387
6.7.3 有界地层平均拟压力	391
6.7.4 气井的现代试井	393
7 两种流体界面的运动理论和多相渗流	395
7.1 多相渗流的基本知识	396
7.1.1 流体的饱和度	396
7.1.2 界面张力和湿润性	397
7.1.3 毛管力	399
7.1.4 相对渗透率	403
7.2 有动界面的不可压缩流体流动	406
7.2.1 平面平行流动的活塞式驱替	406
7.2.2 井筒污染区域	408
7.2.3 动界面的稳定性和黏性指进	411
7.2.4 底水锥进	413
7.3 有动界面的可压缩流体流动	417
7.3.1 两区系统的注入能力解	418
7.3.2 两区系统的压力衰减解	422
7.3.3 注入井压力衰减试井	431
7.4 油、水两相渗流	432
7.4.1 油、水两相等温渗流的一般提法	432
7.4.2 忽略毛管力和重力的一维流动・Buckley-Leverett 方程	433
7.4.3 考虑毛管力的一维流动・相似性解	435

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 煤层气输运的数学模型	511
8.5.4 试井分析	513