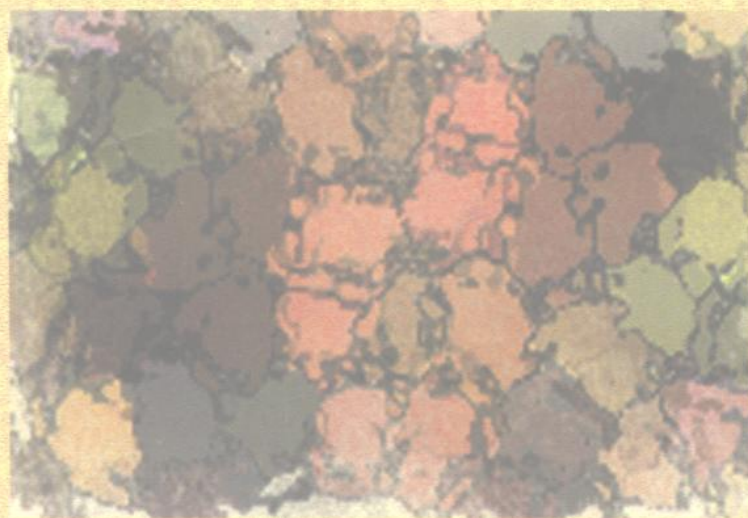


孔祥言 编著

高等 渗流力学

Advanced Mechanics
of Fluids in Porous
Media



中国科学技术大学出版社

0357.3

452784

k76

高等渗流力学

Advanced Mechanics of Fluids in Porous Media

孔祥言 编著



00452784

中国科学技术大学出版社

1999 · 合肥

图书在版编目(CIP)数据

高等渗流力学/孔祥言编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,1999.7
ISBN 7-312-01052-0

I. 高… II. 孔… III. 渗流力学 IV. O357.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 33422 号

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号,230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm/16 印张:32.5 字数:829 千

1999 年 7 月第 1 版 1999 年 7 月第 1 次印刷

印数:1—2 100 册

ISBN 7-312-01052-0/O·215 定价:36.00 元

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 30 多卷。然而,有关该领域中适合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,它对地下水水文学、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、格林函数法和积分变换法,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的实际问题,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,本书也占有一定篇幅。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97级硕士生陈国权和几位本科生为本书部分插图作了精心的绘制,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

目次

前 言	1
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	2
0.2 20 世纪渗流力学的发展和研究近况	2
0.2.1 物理化学渗流	3
0.2.2 非等温渗流	3
0.2.3 非牛顿流体渗流	3
0.3 对 21 世纪前期渗流力学理论与应用研究的展望	4
0.3.1 理论、实验和方法研究	4
0.3.2 应用研究	6
1 基本概念和基本方程	8
1.1 引 言	8
1.1.1 渗流和渗流力学	8
1.1.2 多孔介质	8
1.1.3 储油层和含水层	10
1.1.4 油藏中驱油方式·二次和三次采油	12
1.2 流体的性质	14
1.2.1 石油流体的组分和相态变化	14
1.2.2 流体的密度和重率	15
1.2.3 流体的粘度·溶解油气比	16
1.2.4 流体的压缩系数和热膨胀系数·状态方程	17
1.2.5 原油的地层体积系数	18
1.3 多孔介质的性质	18
1.3.1 多孔介质的孔隙度	19
1.3.2 比面、迂曲度、渗透率	21
1.3.3 多孔介质的压缩系数·状态方程	22
1.4 几个运动学问题	24
1.4.1 渗流速度·Dupuit-Forchheimer 关系式	24
1.4.2 描述流体运动的欧拉观点和拉格朗日观点	25
1.4.3 物理量的物质导数与当地导数	27
1.4.4 源和汇	29

1.5	运动方程	30
1.5.1	Darcy 定律·渗透率	31
1.5.2	Darcy 定律对于流体速度和密度的适用范围	32
1.5.3	Darcy 定律的推广	35
1.5.4	Darcy 定律的推导	37
1.6	连续性方程	39
1.6.1	单相流体渗流的连续性方程	40
1.6.2	油水两相不溶混渗流的连续性方程	41
1.6.3	油气水三相渗流的连续性方程	42
1.7	能量方程	43
1.7.1	热力学和传热学基础	43
1.7.2	非等温渗流能量方程的一般论述	45
1.7.3	单相流体非等温渗流的能量方程	47
1.7.4	油气水三相非等温渗流的能量方程	49
1.8	物性方程	49
1.8.1	状态方程	50
1.8.2	本构方程	50
1.9	单相液体等温渗流偏微分方程及其定解条件	52
1.9.1	渗流偏微分方程	52
1.9.2	边界条件和初始条件	55
1.9.3	偏微分方程的基本概念及其定解问题	57
2	单相液体的稳态渗流	59
2.1	几种一维流动和二维流动	59
2.1.1	平面平行流	59
2.1.2	平面径向流	59
2.1.3	球形向心流	61
2.1.4	边界上压力分布与角度有关的流动	61
2.2	复变函数理论在单相液体平面稳态渗流中的应用	64
2.2.1	一般分析	64
2.2.2	用复变函数法求解某些简单流动	68
2.2.3	用叠加方法求解	70
2.2.4	用镜像法求解	73
2.2.5	用保角变换法求解	75
2.3	小井群问题	81
2.3.1	双井和四口井	81
2.3.2	五口井和九口井	82
2.3.3	圆周上井排	83
2.3.4	无限长直线供给边界附近小井群	84
2.4	无限井排	85
2.4.1	无限大地层中单一井排	85
2.4.2	直线供给边线附近一平行井排	86

2.4.3 直线供给边线附近双井排·遮挡效应	87
2.5 注水井网·有效传导率	89
2.5.1 引 言	89
2.5.2 对正排列的注水井网	89
2.5.3 五点式井网和交错排列井网	91
2.5.4 七点式井网	94
2.5.5 注水井网的电比拟试验	96
2.6 水驱效率	97
2.6.1 对正排列井网直线驱的水驱效率	98
2.6.2 交错排列井网直线驱的水驱效率	99
2.6.3 五点式井网的水驱效率	100
2.6.4 七点式井网的水驱效率	101
2.6.5 注水井网的一般讨论	101
3 分离变量法和积分变换法	103
3.1 分离变量法一般论述	103
3.1.1 基本概念	103
3.1.2 Sturm-Liouville 问题的正交性	104
3.1.3 解的表达式	105
3.2 直角坐标系中的分离变量	105
3.2.1 变量的分离	105
3.2.2 有限区域的一维流动	106
3.2.3 半无限区域的一维流动	109
3.2.4 多维无源汇非稳态渗流	111
3.2.5 多维有源汇非稳态渗流	112
3.3 圆柱坐标系中的分离变量	114
3.3.1 变量的分离	114
3.3.2 贝塞尔方程的特征值问题	115
3.3.3 平面径向流	121
3.3.4 柱坐标系中二维流动	123
3.4 球坐标系中的分离变量	126
3.4.1 变量的分离	126
3.4.2 勒让德方程和勒让德函数	126
3.4.3 整个球形区域的球对称流动	128
3.4.4 空心球形区域的球对称流动	129
3.5 积分变换法一般论述	130
3.5.1 积分变换对的构造	130
3.5.2 方程和初始条件的变换结果	131
3.5.3 方程的解	133
3.5.4 吉布斯现象	134
3.5.5 积分变换法的求解步骤	134
3.6 直角坐标系中的积分变换	135

3.6.1	有限区域的一维流动	135
3.6.2	有限区域流动解的分解方法	136
3.6.3	半无限区域的一维流动	140
3.6.4	直角坐标系中多维流动	141
3.7	圆柱坐标系中的积分变换	143
3.7.1	有限区域的平面径向流	143
3.7.2	无限大区域的平面径向流	145
3.7.3	轴对称的二维流动	145
3.7.4	扇面形区域的二维流动	146
3.8	球坐标系中的积分变换	148
4	源函数、格林函数的应用	150
4.1	瞬时点源和玻耳兹曼变换	150
4.1.1	非稳态平面平行流	150
4.1.2	非稳态平面径向流	151
4.1.3	瞬时点源解	152
4.1.4	等强度持续点源	153
4.2	变强度持续点源	155
4.2.1	变产量的压力降落	155
4.2.2	变产量的压力恢复	157
4.3	无限大地层中源汇分布	158
4.3.1	无限大平面中直线源	158
4.3.2	无限大平面中条带源	159
4.3.3	无限大平面中圆周源	159
4.3.4	无限大平面中圆面源	160
4.4	有直线边界地层中源汇分布	162
4.4.1	条带形地层中直线源	162
4.4.2	条带形地层中条带源	164
4.4.3	基本瞬时源函数表	165
4.5	Newman 乘积法与多维瞬时源函数·格林函数	166
4.5.1	Newman 乘积法	166
4.5.2	分支水平井	168
4.5.3	油藏中瞬时源函数表·格林函数	171
4.6	常规试井分析	172
4.6.1	探测半径和压力扩散	173
4.6.2	表皮因子和井筒储集系数	175
4.6.3	定产量压力降落和压力恢复试井	179
4.6.4	由压力降落曲线确定断层的夹角	182
4.6.5	变产量压力降落和压力恢复试井	183
4.6.6	水平井压力降落试井	185
4.7	图版拟合试井解释方法	187
4.7.1	方形地层中铅垂裂缝井	188

4.7.2 无限大地层中有限导流性铅垂裂缝井	189
4.8 解一般渗流方程的格林函数法	192
4.8.1 用格林函数求解的一般理论	192
4.8.2 格林函数的构造方法	195
4.8.3 小 结	196
4.9 格林函数法的应用	196
4.9.1 格林函数在直角坐标系中的应用	196
4.9.2 格林函数在圆柱坐标系中的应用	199
5 拉普拉斯变换法	202
5.1 拉普拉斯变换及其性质	202
5.1.1 拉普拉斯变换的定义	202
5.1.2 拉普拉斯变换的主要性质	203
5.2 拉普拉斯变换的解析反演	206
5.2.1 利用拉普拉斯变换表进行反演	207
5.2.2 利用围道积分求原函数	209
5.3 拉普拉斯变换的数值反演	214
5.3.1 Stehfest 方法	215
5.3.2 Crump 方法	215
5.3.3 小 结	217
5.4 圆形有界地层中心一口直井	218
5.4.1 外边界封闭情形	218
5.4.2 外边界定压情形	221
5.4.3 平均地层压力	223
5.5 同心圆复合油藏	227
5.5.1 拉普拉斯变换空间的解	227
5.5.2 物理空间的压力函数	228
5.5.3 井底压力	231
5.6 无限大地层	232
5.6.1 无限大地层中直井的压力	232
5.6.2 无限大地层中直井的现代试井	235
5.6.3 无限大地层中水平井·考虑表皮和井储	237
5.6.4 无限大地层中水平井的现代试井	239
5.7 Duhamel 定理	242
5.7.1 Duhamel 定理的数学表述	242
5.7.2 Duhamel 定理的证明	243
5.7.3 某些特殊情况下 Duhamel 定理的数学表述	244
5.7.4 Duhamel 定理的应用	246
6 气体的渗流理论	248
6.1 天然气的物理特性	248
6.1.1 气体状态方程和偏差因子	249

6.1.2	气体压缩系数、 $\bar{\gamma}$ 值和地层体积系数	249
6.1.3	天然气的粘度	251
6.1.4	干气、湿气和反转凝析气	252
6.2	气体渗流方程	253
6.2.1	基本方程	253
6.2.2	气体渗流偏微分方程的一般形式	254
6.2.3	气体渗流的拟压力方程	256
6.2.4	气体渗流偏微分方程的线化和无量纲化	260
6.2.5	小结	262
6.3	气体稳态渗流	263
6.3.1	平面平行稳态渗流	263
6.3.2	平面径向稳态渗流	264
6.3.3	平面径向非 Darcy 稳态渗流	264
6.4	铅直气井非稳态渗流	265
6.4.1	无限大地层定产量井	266
6.4.2	圆形有界地层中心一口定产量井和定压井	269
6.4.3	几种较复杂情形的解析解	272
6.5	水平井气体渗流	274
6.5.1	高压气藏中水平井	274
6.5.2	低压气藏中水平井	277
6.6	气井的产能试井	279
6.6.1	产能分析基本关系式	279
6.6.2	常规产能试井	281
6.6.3	等时产能试井	283
6.6.4	改进的等时产能试井	285
6.7	气井的压力降落和压力恢复试井	285
6.7.1	压力降落常规试井	286
6.7.2	压力恢复常规试井	288
6.7.3	有界地层平均拟压力	291
6.7.4	气井的现代试井	292
7	两种流体界面的运动理论和多相渗流	294
7.1	多相渗流的基本知识	294
7.1.1	流体的饱和度	295
7.1.2	界面张力和湿润性	296
7.1.3	毛管力	297
7.1.4	相对渗透率	300
7.2	有动界面的不可压缩流体流动	302
7.2.1	平面平行流动的活塞式驱替	302
7.2.2	井筒污染区域	304
7.2.3	动界面的稳定性和粘性指进	306
7.2.4	底水锥进	308

7.3 有动界面的可压缩流体流动	310
7.3.1 两区系统的注入能力解	311
7.3.2 两区系统的压力衰减解	314
7.3.3 注入井压力衰减试井	322
7.4 油水两相渗流	322
7.4.1 油水两相等温渗流的一般提法	322
7.4.2 忽略毛管力和重力的一维流动·Buckley-Leverett 方程	323
7.4.3 考虑毛管力的一维流动·相似性解	325
7.4.4 面积注水问题	328
7.5 油气两相和油气水三相渗流	329
7.6 相似理论和水驱油的物理模拟	331
7.6.1 模拟试验的理论基础	332
7.6.2 水驱油物理模拟的相似法则	334
7.6.3 原型与模型之间有关量的匹配与换算	338
7.7 注蒸汽采油的数值模拟	339
7.7.1 描述蒸汽驱的微分和差分方程	340
7.7.2 差分方程组的隐式处理	343
7.7.3 方程组的解法	346
7.7.4 热损失项的计算	347
8 双重和分形介质中的渗流	348
8.1 基本概念和数学描述	348
8.1.1 裂缝性油藏的特性	348
8.1.2 双重介质中渗流的微分方程	349
8.1.3 双孔隙度和双渗透率问题	350
8.2 双孔介质中的渗流	351
8.2.1 双孔介质中拟稳态渗流	351
8.2.2 考虑表皮和井储的拟稳态渗流	354
8.2.3 双孔介质中非稳态渗流	356
8.3 双渗介质中的渗流	359
8.3.1 圆形有界地层定压生产情形	360
8.3.2 无限大地层考虑表皮和井储定产量情形	362
8.3.3 无限大双层油藏	366
8.4 多层油藏	372
8.4.1 无限大多层油藏	373
8.4.2 圆形封闭多层油藏	374
8.5 煤层甲烷气渗流	376
8.5.1 煤层和煤层气的有关特性	377
8.5.2 气体的扩散·Fick 定律	380
8.5.3 煤层气输运的数学模型	382
8.5.4 试井分析	384
8.6 分形油藏	386

8.6.1	多孔介质的分形特性	387
8.6.2	多孔材料孔隙分形特性的测量	389
8.6.3	分形油藏的数学描述	390
8.6.4	分形网络介质的压力解	393
9	非牛顿流体渗流和非 Darcy 渗流	395
9.1	非牛顿流体的分类及其流变学特性	395
9.1.1	非牛顿流体及其分类	395
9.1.2	与时间无关的纯粘性流体	396
9.1.3	与时间有关的纯粘性流体	398
9.1.4	粘弹性流体	400
9.2	幂律型流体渗流	401
9.2.1	视粘度与有效渗透率	401
9.2.2	幂律流体的渗流方程	404
9.2.3	线性化方程的解	405
9.3	Bingham 流体渗流	408
9.3.1	启动压力梯度与屈服应力的关系	408
9.3.2	Bingham 流体的渗流方程	410
9.3.3	Bingham 流体渗流的边界条件	411
9.3.4	问题的求解	413
9.4	非牛顿流体稳态渗流	414
9.4.1	幂律流体	414
9.4.2	Bingham 流体	415
9.5	双孔介质中幂律流体径向渗流	415
9.5.1	双孔介质中隙间拟稳态渗流情形	416
9.5.2	基质中非稳态渗流情形	418
9.6	双孔介质中 Bingham 流体径向渗流	419
9.6.1	双孔介质中隙间拟稳态渗流	420
9.6.2	基质中非稳态渗流模型	420
9.7	分形介质中 Bingham 流体渗流	421
9.8	非 Darcy 渗流	423
9.8.1	一般论述	423
9.8.2	垂直裂缝井情形	425
10	多孔介质中的对流	428
10.1	数学描述	428
10.1.1	Darcy 定律的推广	428
10.1.2	对流方程组和 Boussinesq 近似	429
10.1.3	热对流的相似律	431
10.2	无限大水平多孔介质层中的对流	432
10.2.1	单纯导热情形	432
10.2.2	线性稳定性分析	432

10.3 介质内部加热	435
10.3.1 铅垂热平板	436
10.3.2 水平热平板	438
10.3.3 水平热圆柱	440
10.4 有限区域中的热对流	441
10.4.1 二维矩形截面区域底部加热	441
10.4.2 三维长方体区域底部加热	443
10.5 对流的分叉	447
10.5.1 一般分析	448
10.5.2 有限差分方法	450
10.5.3 计算结果及其分析	454
10.5.4 摄动法	456
10.6 混沌	459
10.6.1 引 言	459
10.6.2 矩形区域内部有均匀热源问题的数学描述	460
10.6.3 研究对流混沌现象的高阶差分近似	461
10.6.4 周期振荡、混沌和阵发性	463
习 题	465
附 录	480
A. 全椭圆积分、幂积分函数、误差函数、伽玛函数	480
B. 贝塞尔函数	481
C. 常用表	487
主题索引	491
参考文献	495

0 绪 论

0.1 渗流力学研究的内容及其重要意义

流体通过多孔介质的流动称为渗流。多孔介质是指由固体骨架和相互连通的孔隙、裂缝或各种类型毛细管所组成的材料。渗流力学就是研究流体在多孔介质中运动规律的科学。它是流体力学的一个独立分支,是流体力学与岩石力学、多孔介质理论、表面物理和物理化学交叉渗透而形成的。

渗流力学的应用范围越来越广,日益成为多种工程技术的理论基础。由于多孔介质广泛存在于自然界、工程材料和动植物体内,因而就渗流力学的应用范围而言,大致可划分为地下渗流、工程渗流和生物渗流 3 个方面。

0.1.1 地下渗流

地下渗流是指土壤、岩石和地表堆积物中流体的渗流。它包含地下流体资源开发、地球物理渗流以及地下工程中渗流几个部分。地下流体资源包括石油、天然气、煤层气、地下水、地热、地下盐水以及二氧化碳等等。与此相关的除能源工业外还涉及农田水利、土壤改良(特别是沿海和盐湖附近地区的土壤改良)和排灌工程、地下污水处理、水库蓄水对周围地区的影响和水库诱发地震、地面沉降控制等。

地球物理渗流是指流体力学和地球物理学交叉结合而出现的渗流问题。这些问题的研究进一步推动了渗流力学理论的发展。地球物理渗流包括雪层中的渗流和雪崩的形成、地表图案的形成、海底永冻层的溶化、岩浆的流动和成岩作用过程以及海洋地壳中的渗流等。在雪层中由于底部温度通常高于表面温度,所以在干燥的雪层中存在导致不稳定的空气密度梯度。当这种不稳定性足够强时,就会出现雪崩。Powers 等(1985)研究了雪层中的渗流。在北极地区或多山地区,地表会出现圆形、条带形或多边形的规则图案。这是由于水饱和的土壤中因日夜的、季节的或其它反复的冻结-溶化循环引起石块和颗粒分离而形成的,多边形图案的直径可以从 0.1m~10m。Gleason 等(1986)和 George 等(1989)根据渗流力学理论详细研究了这些图案形成的机理。在大约 18 000 年以前的冰期,海平面比现在约低 100m 左右。较低的环境温度使北极地区陆地形成永冻层。随着海平面升高,表层溶化,Gosink & Baker(1990)从理论、实验和现场研究表明盐的指进对永冻层的溶化起着主要作用。关于岩浆的流动,在一般情况下可用 Navier-Stokes 方程描述。但在某些情况下,例如,当岩浆结晶时在腔壁附近形成多孔介质;再如当岩浆出现时形成局部熔化,并且这种熔化物沿相互连通的纹理凝缩,这时岩浆的流动遵从 Darcy 定律,Ryan(1990)详细论述了岩浆渗流的理论。Palm(1990)研究了成岩过程的渗流机理,Stevenson & Scott(1991)对岩浆渗流的研究作了述评,而海洋地壳中的渗流可参看 Lowell(1980)的研究。

许多地下工程问题与地下渗流密切相关。如地下储气库工程、地下国防工程、水工建筑、铀

矿等资源的地下沥取以及核废料的处理等。

0.1.2 工程渗流

工程渗流(或工业渗流)是指各种人造多孔材料和工程装置中的流体渗流。在国民经济和国防建设部门的诸多工程技术中广泛使用各种类型的人造多孔材料,出现各式各样的多孔体技术,研究流体在这些多孔材料中运动规律是非常必要的(郭等,1986),工程渗流涉及化学工业、冶金工业、机械工业、建筑业、环境保护、原子能工业以及轻工食品等领域。化学工业中有很多渗滤过程。如过滤、洗涤、浓缩和分离。填充床内具有复杂化学反应过程,其中有许多涉及渗流理论,冶金和陶瓷工业中也有很多渗流力学问题,如炼铜工艺中细菌炼铜和底吹氩气;金属熔液在铸造砂型中的传热传质;耐火材料、陶瓷和金属陶瓷等人造多孔材料的物理化学性质都与渗流过程有关。建筑业所用砖石、混凝土、木材和粘土等中水气渗流影响它们的应力-应变关系。环保技术中的污水处理、海水淡化、原子能工业中清除放射性粒子和工业废液等亦已进行了渗流研究。航空、航天工业中使用多孔材料一直受到重视,发汗冷却技术就是其中一例。此外,如煤炭的堆积、谷物和棉纺材料的储存都存在气体渗流问题。造纸工业中的纸浆渗滤等问题也给渗流力学的理论和应用提出了课题。

工程渗流问题一般都比较复杂,涉及多相渗流、非牛顿流体渗流、物理化学渗流和非等温渗流等。这些问题的解决对国民经济有重要作用,并反过来进一步促进渗流力学的发展。

0.1.3 生物渗流

生物渗流是指动植物体内的流体流动,是流体力学与生物学、生理学交叉渗透而发展起来的,大致可分为动物体内的渗流和植物体内的渗流。

关于动物体内的渗流,郭、于、吴(1982,1986)对生物脏器管道系统的铸型标本进行微观和宏观研究表明:动物4种脏器的8种管道系统属多孔介质。它们是肾的血管系统和泌尿管道系统;肺的血管系统和肺泡-微细支气管系统;肝的血管系统、窦周间隙系统和胆小管系统;以及心的血管系统。这些系统具有多孔介质的主要特征,即孔径很小而比面很大。流体在其中流动就是渗流。不同生物脏器的孔隙度差别很大,例如,猪肾为0.161,兔肝为0.275,兔肺为0.495。从生理学、组织胚胎学和解剖学等的资料数据看,这一结论对人体和哺乳动物的其它某些脏器和组织内的微细孔道系统也是有效的,例如,脑血管系统。由于这些系统均属多重介质,其中流动的流体又属非牛顿流体(如血液),因而这类渗流是比较复杂的。与人体有关的渗流主要研究血液循环、淋巴液循环、呼吸以及关节润滑等有关问题。

关于植物渗流,研究表明:植物的根、茎、叶也多是多孔介质,植物体内水分、糖分和气体的输运过程均属生物渗流。

生物渗流的研究对人体健康和疾病防治、植物生长和农林业的发展有重要意义。

鉴于渗流力学内容非常广泛,不可能面面俱到。本书主要论述地下渗流领域的物理模型分析、数学处理方法及其在油气水、煤层气和地热开发等方面的工程应用。

0.2 20世纪渗流力学的发展和研究近况

1856年,法国水利工程师H·Darcy(达西)在解决第戎(Dijon)的城市给水过程中,在一系

列实验的基础上,总结出线性渗流方程,即后来被称之为 Darcy 定律,这标志着渗流力学的诞生。在这之后,俄国的数学力学家 N·E·儒可夫斯基在 19 世纪末对渗流问题进行了研究,并于 1889 年导出了渗流微分方程。他正确地指出在数学上渗流和热传导有相似性质。20 世纪,渗流力学有了长足的发展。

对油气渗流较为系统的研究是从 20 世纪 20 年代开始的,随着石油工业的崛起,油气渗流迅速发展起来,到 30~40 年代,单相不可压缩和微可压缩流体在均质地层中的渗流问题已基本解决(见参考书目[1])。这可归结为求解拉普拉斯方程和 Fourier 方程。单相气体在均质中渗流的微分方程于 20 年代建立,其稳态(即定常,石油工程界称为稳定)渗流的微分方程也具有拉普拉斯方程的形式。非稳态(即非定常,石油工程界称为不稳定)渗流的数学模型是二阶非线性抛物型方程。50 年代求得一维条件下的相似性解。对多相渗流的研究始于 30 年代。由于低于饱和压力下的油田开发和注水开发促进了油气二相和油水二相渗流的研究。同时建立起相对渗透率和毛管力的概念。Buckley & Leverett(1942)在忽略毛管力条件下借助于特征线法给出一维情况下二相液体渗流方程的特解,经过处理得出饱和度的间断解。Sheldon 等(1959)用激波的观点研究了该间断问题。考虑毛管力的某种特殊情形,陈(1965)曾给出一个相似性解,陈、刘(1980)、陈、袁(1980)进一步研究了双重介质和三维情形的二相渗流。一般的二相和三相渗流问题均需进行数值求解。60 年代开始,随着碳酸盐岩介质模型的建立以及这类油田的开发,关于裂缝介质以及多重介质中渗流的研究不断增加,刘、郭(1982)概述了 70 年代的研究进展。采用人工压裂强化采油措施,也促进对各类裂缝问题的研究。

近年来渗流力学的发展主要在以下几个方面。

0.2.1 物理化学渗流

物理化学渗流是指含有复杂物理变化和化学反应过程的渗流。这些物理变化和化学反应过程有对流、扩散、弥散、吸附、解吸、浓缩、分离、互溶、相变、多组分以及氧化、乳化、泡沫化等等。在研究三次采油、铀矿地下沥取、化工、土壤盐碱化防治和盐水淡化诸技术中,都需要考虑物理化学渗流(郭等,1990)。

0.2.2 非等温渗流

传统的渗流力学都把渗流看作等温过程,非等温是指除了考虑压力场和速度场以外,还要考虑温度场。在三次采油、地热开发以及某些工程渗流中,必须考虑流场中的温度分布以及流体和固体的热膨胀系数和热交换系数。稠油的热采包括注蒸汽、注热水、火烧油层和电加热等。注蒸汽又可分为吞吐(间歇注入)和蒸汽驱油(连续注入)。到 80 年代热采的技术指标和经济指标均已成熟,在美、俄、加、委等国均有热采油田。我国克拉玛依油田、胜利油田和辽河油田等已进行了多年的热采工作。

0.2.3 非牛顿流体渗流

古典的渗流力学所研究的流体本构关系(应力-应变关系)是线性齐次的。不符合这种应力-应变关系的流体称为非牛顿流体。渗流力学中常碰到的非牛顿流体为宾厄姆(Bingham)型流体、幂律型的拟塑性流体和膨胀性流体。在三次采油中向地层注入驱油剂的溶液、聚合物溶液、乳状液、胶束液和压缩系数大的泡沫液等都是非牛顿流体。在水力压裂工艺中注入的流体