

多孔介质流体动力学

J·贝尔 著

李竞生 陈崇希 译

孙訥正 校

中国建筑工业出版社

多孔介质流体动力学

J·贝尔 著

李竞生 陈崇希 译

孙訥正 校

中国建筑工业出版社

本书是研究多孔介质流体动力学的一本经典著作。著者以严格的理论和例题相结合的形式,叙述了现代多孔介质流体动力学方面的主要成果。全书共十一章。前二章介绍流体、多孔骨架、多孔介质的基本性质,第3~6章叙述了多孔介质流体动力学的基本理论,第7章解初值和边值问题,第8章讲无压流动,第9章讲不溶混流体的流动,第10章专门论述流体动力弥散,第11章介绍模型和模拟。书末附有文献目录和英汉对照与汉英对照的索引。

本书可作为水文地质、农田水利、水工建筑、工程地质、环境保护和油田开发等大学专业的教材或教学参考书,也可供有关的勘察、设计、科研技术人员参考。

Jacob Bear
DYNAMICS OF FLUIDS
IN POROUS MEDIA
AMERICAN ELSEVIER PUBLISHING COMPANY, INC. 1972.

* * *
多孔介质流体动力学

李竞生 陈崇希 译
孙讷正 校

*
中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*
开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 39 1/2 字数: 960 千字
1983年8月第一版 1983年8月第一次印刷
印数: 1—3,600册 定价: 6.25元
统一书号: 15040·4453

校译者的话

本书是研究多孔介质流体动力学的一本经典著作。作者 Jacob Bear (贝尔) 曾在美国和以色列的许多大学任教, 从事地下水水文学、水资源管理和环境工程等方面的研究工作, 撰写了大量的科学论文和著作, 是世界著名的地下水水文学家。

本书的最大特点在于其理论的系统性和严密性。作者以多孔介质表征性体积单元 (REV) 作为研究问题的出发点, 对所有基本概念都给出了确切的定义。在此基础上, 利用各种守恒原理和平均方法导出了描述多孔介质中流体运动、物质输运和能量输运的数学模型。然后把数学分析与室内试验和野外试验密切地结合起来, 以确定模型的参数和定解条件。作者以建立和解算描述各种现象的物理模型和数学模型为中心构造了多孔介质流体动力学的理论体系。本书的另一特点是它取材的广泛性, 它几乎涉及到了与多孔介质中流体运动有关的各个学科。除了通常的“地下水水文学”所包括的一些内容外, 它还系统而深入地研究了非饱和带问题、储油层中多相流动问题, 多孔介质中的物质输运问题和能量输运问题等。这些材料在其他出版物中还很少见到。因此本书可以作为水文地质、农田水利、水工建筑、工程地质、环境保护和油田开发等专业的教材或教学参考书; 也可供有关的勘察、设计和科研技术人员参考。

自本书出版以来, 对于发生在多孔介质中的各种现象的机理研究进展不大, 但求解数学模型(初值和边值问题)的方法和能力却有了较大的提高。目前数值方法已被广泛采用, 成为解决实际的渗流问题和输运问题的主要手段。本书详尽地介绍了各种解析解法, 并用了专门一章介绍模型和模拟法。相比之下, 对数值方法的介绍显得薄弱一些。因此, 想掌握和研究数值方法的读者应在阅读本书的基础上, 再进一步参考有关的著作(例如国内已出版的有: 孙纳正著《地下水流的数学模型和数值方法》, 1981年, 地质出版社; 薛禹群、谢春红编著: 《水文地质学的数值法》1980年, 煤炭工业出版社)和论文。

本书的序言、第1、2、3、4、5、7、8章及索引(英汉对照部分)由煤炭工业部地质勘探研究所李竞生译出; 武汉地质学院陈崇希译第6、9、11章并编了汉英对照的索引; 山东大学孙纳正译第10章; 中国建筑工业出版社石振华统一并订正了名词术语。全书由孙纳正校。在校译过程中, 发现原文有多处刊误, 笔误及公式推导错误, 译文中都一一作了更正。

在付印前, 我们收到了美国夏威夷大学水资源研究中心主任 L. Stephen Lau (刘) 教授寄来的原著者的勘误表。此译本已照勘误表作了更正, 并注明 * 符号。对著者本人仍未勘出的错误, 我们以译注的形式分别在页下加以说明。

限于校译者的水平, 译文中难免有错误和不当之处, 敬请读者批评指正。

1982.8.

序 言

本书试图系统地介绍可应用于多种学科和工程的多孔介质流体动力学（实际上也包括静力学）理论。多年来，我在以色列 Technion 理工学院、美国麻省理工学院和其它几所院校讲授流体通过多孔介质流动的课时，一直是把这一课题作为其它课程例如地下水水文学的一部分内容来处理的。我深感在多孔介质流体动力学方面缺少一本合适的教科书。对于这一课题来说，一本理想的教科书应当是从流体力学和连续介质力学的基本原理出发，阐明从微观水平到宏观水平处理问题的过程，应当强调多孔介质的主要特点，建立起宏观理论，并进而说明如何将这些理论应用于所考虑的实际问题。

令人颇感惊奇的是，尽管在许多工程学科中，例如在石油工程学，地下水水文学、农业工程学和土力学中，多孔介质流体动力学的理论具有重要意义，但在这方面可供使用的专门著作却为数极少。尤其是有关这方面的文章已大量见诸于各种科学和工程技术杂志的情况下，出现这种现象就更使人感到意外。虽然多孔介质流体动力学应当成为一门为几个系服务的有趣的中间学科课程，但我认为目前这门课程在大学里设置较少的部分原因是由于缺少一本合适的教科书。为了克服这个不足，我为自己讲课编写了讲稿；这里我把这份讲稿以书的形式介绍出来，我希望它能为从事类似工作的人所采用。

本书主要是为地下水水文学、土力学、土壤物理学、排水与灌溉工程学、卫生工程学、石油工程学和化学工程学等方面的高年级学生和毕业生编写的；在这些学科中，流体通过多孔介质的流动具有重要的意义。我也希望本书能满足业已在这些领域里从事工作的科学家和工程师的要求，因为对他们的工作来说需要一个坚实的理论基础。本书重点阐述发生在多孔介质中的微观现象和它们的宏观描述方法，使读者不仅能够明了在多孔介质流动问题的宏观描述中所出现的各种参数和系数的含义，掌握它们的实际测定方法，而且懂得这种描述本身的局限性和近似性。在各种情况下，目的在于用明确的公式来表示所考虑的流动问题：即借助于偏微分方程及一组初始条件和边界条件对流动问题作出完整的数学陈述。一个流动问题只要从数学上看是适定的，那么原则上可能有三种解法：解析解法、求助于高速计算机的数值解法和试验室的模型与模拟解法。本书对所有这些解法都作了叙述。虽然解析解法的典型例子见于全书各处，但本书并不打算去收集大量的已经求得解析解的问题。介绍了数值解法的原理，详细地描述了试验室模型和模拟以及它们的比例确定方法和应用。

书中用到的数学知识十分广泛，包括诸如向量分析、笛卡尔张量分析、偏微分方程以及函数论初步等课目，因而期望读者在高等工程数学方面具有一个良好的基础。

本书不准备完整地列举业已发表的全部文献资料，也不准备去指出某一问题的第一位作者。选列的参考书目是我认为代表了比较重要的观点，或从教学角度来看较为合适的，或一般读者容易得到的那些文献。

很明显，单独一本书，即使象本书这样的篇幅也不能包括与这一问题有关的全部内

容。虽然我们考虑的是一般的多孔介质，但讨论仅限于孔隙较大的介质，因此粘土和由胶体颗粒构成的微孔隙介质不在考虑之列。类似地，我们也不考虑化学表面现象和电化学表面现象。讨论仅限于牛顿流体。

考虑到这些目标和限制，本书第1章列举两种重要的多孔介质——地下水含水层和储油层；目的是给出多孔介质的定义，并引进连续介质的方法作为处理多孔介质中各种现象的工具。为此需要在定义孔隙率的基础上定义“表征性体积单元”。第2章概述某些重要流体和多孔骨架的性质。第3章引入压力和测压水头的概念。第4章首先给出流体连续介质中速度和通量的定义；然后介绍流体连续介质中质量、动量和能量守恒方程，并利用多孔介质的理想模型将这些方程加以平均，导出描述流体通过多孔介质流动的基本方程，即体积和质量守恒方程以及适用于各向异性介质和非均质流体一般情况的运动方程；在守恒方程中还包括溶液中一种组分的质量守恒方程，也称之为流体动力弥散方程。虽然运动的基本方程和质量守恒的基本方程是从第4章的一些主要原理导出的，但在第5章和第6章又回到这些课题，目的是从不同的角度讨论它们，这也许对不太精通流体力学的读者更为合适。第5章介绍运动方程；首先从它原来的一维形式开始（由Darcy根据试验提出），进而将其推广到三维流动，可压缩流体和各向异性介质。这一章还包括关于Darcy定律理论推导的一个论述；我们介绍这一论述和其它类似论述的目的在于指明研究方法，例如理想模型和统计模型的法。本章还包括大雷诺数运动方程一节。

在第6章里，引进控制体积方法，这是推导质量守恒方程的一种通用方法。对可变形介质给予了特别的注意；本章还包括流函数以及它和测压水头的关系。连续性方程，即质量守恒方程一经建立，下一步自然是考虑初始条件和边界条件。第7章对这些内容作了详细介绍。重点是潜水面边界条件及其在远端平面上的描述方法。本章后半部分讨论了各种解析解法和数值解法。

至此，读者应当能够利用适当的偏微分方程和初始条件、边界条件来陈述多孔介质中的流动问题。也应当知道求解的主要方法（模拟解法在第11章讨论）。

第8章阐述无压含水层中的流动问题。这在地下水水文学和排水工程学中是经常遇到的。本章解释了Dupuit假定，并利用该假定导出了无压流动的连续方程。通过大量例题详细讨论了远端曲线法，因为它是求解二维稳定潜水流动问题的一种有用工具。本章还介绍了把无压流动的非线性方程线性化的几种方法和解法。

以上所有的讨论只限于单相流动，第9章将这些讨论推广到多孔介质中的多相流动。多相流动问题在石油工程学中具有特别重要的意义。本章首先给出饱和度、毛细压力和相对渗透率的基本概念；而后建立运动方程和连续性方程。象土壤物理学家处理非饱和流动问题那样，本章把非饱和流动视为不溶混流体流动的一种特殊情况，这里作为流体之一的空气处于稳定和压力不变的状态。本章较为详细地考虑了与入渗有关的几种特殊情形。引进了突变界面的新概念，以代替出现在可溶混的或不可溶混的两种流体之间的实际过渡带。本章还详细地讨论了地下水水文工作者十分关心的滨海含水层的淡水与咸水的界面问题。

第10章论述流体动力弥散问题。虽然基本方程是从第4章中的主要原理导出的，但仍介绍了推导这一方程的其它几种理论。本章对弥散系数及其与骨架和流动特征的关系给予了特别注意本章的最后一节讨论热量输运和物质输运问题。

第11章介绍模型和模拟的用法。模型和模拟既可以作为研究现象的工具，也可以作为求解边值问题的工具。本章介绍了确定模型和模拟比例的通用方法，详细描述了砂槽模型、各类电模拟、Hele-Shaw 模拟和薄膜模拟。对每种情形，都介绍了应用方法。

以上，就是我在本书中选定的研究内容。我之所以把本书写得较为详细和全面，其目的是为了使得读者（不包括那些想要深入研究某些专门问题的读者）尽可能把辅助资料的阅读减少到最低限度。在本书中还附有大量的问题和习题。

我对为完成本书提过批评意见的许多个人表示感谢。特别要感谢 Y. Bachmat 博士、C. Braester 博士、E. A. Hefez 先生和 E. Goldshlager 先生在帮助阅读和讨论本书原稿时所提出的建设性批评。还要感谢麻省理工学院土木工程系；尤其是系主任 C. L. Miller 教授、A. T. Ippen 教授和 D. R. F. Harleman 教授，因为他们使我有机会在该校作为一名访问教授所度过的富有成效的一年中写出了本书的大部分章节。

我的妻子 Siona 在我编写本书的过程中挑起了最重的担子，她承受了许多难以避免的麻烦。对在写作的各阶段她的经常不断地鼓励我表示衷心感谢。

我意识到，要系统地阐述一种理论，正象我在本书中所作的那样，必然会存在缺点。我怀着感激的心情准备接受旨在改进本书的所有读者的建议。

J·贝尔 于以色列海法

目 录

校译者的话	3	2.6.1 定义	36
序言	9	2.6.2 比面的测量方法	37
第1章 引论	1	2.7 骨架与介质的可压缩性	37
1.1 含水层、地下水与储油层	1	第3章 压力与测压水头	42
1.1.1 定义	1	3.1 一点处的应力	42
1.1.2 垂直剖面上的水分分布	1	3.2 流体静压力的分布	45
1.1.3 含水层的分类	3	3.3 测压水头	45
1.1.4 含水层的性质	5	第4章 多孔介质中	
1.1.5 储油层	6	流体运输的基本方程	47
1.2 多孔介质	9	4.1 流体连续介质中的质点、	
1.3 多孔介质的连续介质方法	11	速度与通量	47
1.3.1 分子水平与微观水平	11	4.1.1 质点和速度的定义	47
1.3.2 孔隙率与表征性体积单元	13	4.1.2 扩散速度与扩散通量	49
1.3.3 面孔隙率与线孔隙率	15	4.1.3 Euler 观点与	
1.3.4 速度与比流量	16	Lagrange 观点	51
1.3.5 小结	18	4.1.4 实质导数	52
第2章 流体的性质		4.2 普遍的守恒原理	54
与多孔骨架的性质	20	4.3 流体连续介质的质量、	
2.1 流体的密度	20	动量和能量守恒方程	57
2.1.1 定义	20	4.3.1 一种组分的质量守恒方程	57
2.1.2 流体混合物	22	4.3.2 流体体系的质量守恒	58
2.1.3 密度的测量方法	22	4.3.3 α 组分的线性动量守恒	59
2.2 流体的粘度	23	4.3.4 流体体系的线性	
2.2.1 定义	23	动量守恒	59
2.2.2 非牛顿流体	24	4.4 本构假设与耦合过程	61
2.2.3 单位	24	4.4.1 一般考虑	61
2.2.4 压力和温度的影响	25	4.4.2 建立本构方程应	
2.2.5 粘度的测量方法	25	采用的若干原理	63
2.3 流体的压缩系数	26	4.4.3 耦合过程	63
2.4 多孔介质的统计描述方法	27	4.5 多孔介质模型	67
2.4.1 粒径分布	27	4.5.1 理想模型法	67
2.4.2 孔径分布	29	4.5.2 一种研究流体通过多孔	
2.4.3 其它统计描述方法	30	介质流动的模式	69
2.5 孔隙率	31	4.5.3 参考标架	70
2.5.1 孔隙率与有效孔隙率	31	4.5.4 一种平均化方法	71
2.5.2 孔隙率、结构和排列	32	4.6 体积和质量守恒方程	74
2.5.3 孔隙率的测量方法	34	4.6.1 体积守恒方程	74
2.6 比面	36	4.6.2 溶液中一种组分的	

质量守恒方程	75	5.10 Darcy定律的推导	124
4.6.3 质量守恒方程	77	5.10.1 毛细管模型	125
4.7 运动方程	79	5.10.2 隙缝模型	127
4.8 弯曲率和渗透率	81	5.10.3 水力半径模型	128
4.8.1 弯曲率和渗透率		5.10.4 流动阻力模型	129
之间的关系	81	5.10.5 统计模型	132
4.8.2 弯曲率和其它输运系数	85	5.10.6 平均Navier-Stokes	
4.8.3 采油工程学中的地层		方程的方法	134
因数和电阻率指数	86	5.10.7 Ferrandon模型	136
第5章 均质流体的运动方程	91	5.11 大雷诺数时的流动	137
5.1 Darcy实验定律	91	5.11.1 现象	137
5.2 Darcy定律的推广	93	5.11.2 紊流、惯性力和分离现象	137
5.2.1 各向同性介质	93	5.11.3 非线性运动方程的若干	
5.2.2 各向异性介质	94	例子	140
5.3 偏离Darcy定律的情形	95	5.12 渗透力与渗透应力	142
5.3.1 上限	95	5.12.1 力	142
5.3.2 下限	97	5.12.2 管涌与流砂	144
5.3.3 滑流现象	98	第6章 均质流体的连续性方程	
5.4 有旋运动与无旋运动	98	和守恒方程	151
5.4.1 势和伪势	98	6.1 控制体	151
5.4.2 无旋流动	99	6.2 不变形多孔介质中的质量守恒	151
5.5 各向同性介质的水力传导系数	101	6.2.1 基本的连续性方程	151
5.5.1 水力传导系数与渗透率	101	6.2.2 不可压缩流体的连续性	
5.5.2 单位与例子	103	方程	154
5.6 各向异性介质的渗透率	104	6.2.3 可压缩流体的连续性方程	155
5.6.1 主方向	104	6.3 可压密介质中的质量守恒	157
5.6.2 方向渗透率	109	6.3.1 只有垂向可压密的情形	158
5.7 水力传导系数的测量方法	113	6.3.2 推广到三相和三维的压密	
5.7.1 概述	113	问题	163
5.7.2 定水头渗透仪	114	6.3.3 含水层的气压效率	166
5.7.3 降水头渗透仪	114	6.4 承压含水层和越流含水层中流	
5.7.4 各向异性介质水力传导		动的连续性方程	167
系数的测量方法	115	6.4.1 水平流动近似	167
5.8 层状多孔介质	116	6.4.2 承压含水层中的流动	168
5.8.1 垂直和平行介质层面的		6.4.3 越流含水层中的流动	169
流动	116	6.4.4 在垂线上精确方程的平	
5.8.2 任意定向流动的等效水		均化	172
力传导系数	118	6.4.5 Boltzmann变换	174
5.8.3 作为等效各向异性介质		6.5 流函数	177
的层状介质	120	6.5.1 迹线、流线、纹线和锋面	177
5.8.4 Girinskii势	121	6.5.2 二维流动的流函数	178
5.9 可压缩流体	122	6.5.3 三维流动的流函数	180

6.5.4	关于Lagrange和Stokes 流函数的偏微分方程	182	7.4.2	两种系统中参数之间的 关系	230
6.5.5	势函数与流函数之间的 关系	184	7.4.3	例子	234
6.5.6	解 $\varphi-\psi$ 平面上的问题	187	7.5	叠加与Duhamel原理	236
6.6	流网和地下水等水头线图	188	7.5.1	叠加	236
6.6.1	$\varphi-\psi$ 流网	188	7.5.2	边界条件不依赖于时间的 非稳定流动	237
6.6.2	地下水等水头线图	190	7.5.3	边界条件依赖于时间的非 稳定流动	238
6.7	以 ψ 为因变量表示的非均质不 可压缩流体流动的偏微分方程	191	7.6	一维问题的直接积分法	239
6.7.1	二维流动	191	7.6.1	一维连续性方程的解法	239
6.7.2	轴对称流动	194	7.6.2	湿润面的推进	240
第7章	解初值与边值问题	197	7.7	镜像法	241
7.1	初始条件和边界条件	197	7.7.1	原理	241
7.1.1	给定势的边界	199	7.7.2	例子	243
7.1.2	给定通量的边界	200	7.8	基于函数论的方法	247
7.1.3	没有渗入补给的稳定自由 面(或潜水面)	201	7.8.1	复变数与解析函数	248
7.1.4	没有渗入补给的非稳定 自由面(或潜水面)	203	7.8.2	复势与复比流量	250
7.1.5	有渗入补给的稳定自由面 (或潜水面)	204	7.8.3	源和汇	252
7.1.6	有渗入补给的非稳定自由 面(或潜水面)	205	7.8.4	保角映射	255
7.1.7	饱和带(或毛细管带)的 边界	206	7.8.5	Schwarz-Christoffel 变换	262
7.1.8	渗出面	206	7.8.6	ω 平面上的虚拟流动	266
7.1.9	毛细管暴露面	208	7.9	数值法	266
7.1.10	渗透性不连续的边界	209	7.9.1	有限差分法	267
7.1.11	关于各向异性介质的一 点注记	213	7.9.2	有限单元法	273
7.1.12	借助压力或密度表示的 边界条件	213	7.9.3	松弛法	274
7.2	适定问题	213	7.9.4	Schmidt图解法	275
7.3	在速端平面上边界的表示	214	7.10	用图解法绘制流网	277
7.3.1	速端平面	215	第8章	无压流动与Dupuit近似	283
7.3.2	速端平面上的边界	217	8.1	Dupuit近似	283
7.3.3	边界速端曲线表示的例子	221	8.1.1	Dupuit假定	283
7.3.4	不同类型边界的相交	224	8.1.2	Dupuit假设用于均质介 质中水力稳定流动的例子	286
7.4	各向同性介质中流动问题的解 和各向异性介质中流动问题的 解之间的关系	228	8.1.3	水平层状含水层中的无压 流动	289
7.4.1	流动方程	229	8.1.4	直立层状含水层中的无压 流动	291
			8.1.5	二维非均质介质中的无压 流动	292
			8.2	基于Dupuit近似的连续性 方程	293

8.2.1 连续性方程.....	293	9.3.6 液体与气体同时流动.....	371
8.2.2 边界条件与初始条件.....	296	9.3.7 相对渗透率的实验室测 定法.....	372
8.2.3 Forchheimer方程的 若干解.....	297	9.4 非饱和流动.....	373
8.2.4 Boussinesq方程的若 干解.....	299	9.4.1 毛细压力和持水曲线.....	374
8.3 速端曲线法.....	304	9.4.2 毛细管带.....	377
8.3.1 函数 ω 和 $\bar{\omega}$	304	9.4.3 野外容水率和给水度.....	379
8.3.2 速端曲线法.....	305	9.4.4 运动方程.....	381
8.3.3 无渗出面例子.....	307	9.4.5 非饱和土的相对渗透率.....	384
8.3.4 Hamel映射函数.....	313	9.4.6 连续性方程.....	387
8.3.5 Zhukovski映射函数及 其它映射函数.....	317	9.4.7 解法与实例.....	393
8.3.6 速端平面图解法.....	319	9.4.8 关于入渗和水分再分配 的补充说明.....	400
8.4 线性化方法与所得到的解.....	321	9.4.9 非饱和流动中气体运动 简述.....	402
8.4.1 Boussinesq方程的第一 种线性化方法.....	321	9.5 具有突变界面的不溶混驱替.....	405
8.4.2 Boussinesq方程的第二 种线性化方法.....	328	9.5.1 突变界面近似.....	405
8.4.3 Boussinesq方程的第三 种线性化方法.....	330	9.5.2 界面处于静止状态下的 测压水头和动力平衡条件.....	406
8.4.4 逐次稳态法.....	330	9.5.3 沿界面的边界条件.....	409
8.4.5 小扰动法.....	332	9.5.4 水平面上的界面移动.....	411
8.4.6 薄层流动近似.....	340	9.5.5 垂直平面上的界面移动.....	417
第9章 不溶混流体的流动.....	346	9.5.6 数值法和图解法.....	419
9.1 引言.....	346	9.5.7 基于线性化的近似解法.....	421
9.1.1 两种流体流动的类型.....	346	9.5.8 界面的稳定性.....	425
9.1.2 突变界面近似.....	346	9.6 确定稳定界面的速端曲线法.....	428
9.1.3 出现多种流体同时流动的 场合.....	347	9.6.1 边界条件.....	428
9.2 界面张力和毛细压力.....	347	9.6.2 速端平面上边界的表示.....	429
9.2.1 饱和度与流体的含量.....	347	9.6.3 例子.....	430
9.2.2 界面张力和湿润性.....	348	9.7 滨海含水层中的界面.....	437
9.2.3 毛细压力.....	350	9.7.1 现象.....	437
9.2.4 排泄和吸吮.....	354	9.7.2 Ghyben-Herzberg近 似法.....	438
9.2.5 突变介质中饱和度的间断.....	355	9.7.3 用Dupuit-Ghyben- Herzberg近似法确定 静止界面的形状.....	439
9.2.6 毛细压力的实验室测定法.....	356	9.7.4 移动界面的近似解法.....	441
9.3 两种不溶混流体同时流动.....	359	9.7.5 升锥界面.....	446
9.3.1 基本运动方程.....	359	9.7.6 在厚含水层中非稳定界 面的Dupuit-Ghyben- Herzberg近似.....	450
9.3.2 相对渗透率.....	360	第10章 流体动力弥散.....	454
9.3.3 多相流动的质量守恒.....	366	10.1 流体动力弥散的定义.....	454
9.3.4 多相流动问题的陈述.....	366		
9.3.5 Buckley-Leverett方程.....	368		

10.2 弥散现象的发生	456	11.2.1 两种系统	524
10.3 对某些流体动力弥散理论的 评述	456	11.2.2 几何相似	525
10.3.1 毛细管模型和网格模型	456	11.2.3 运动相似	525
10.3.2 统计模型	460	11.2.4 动力相似	526
10.3.3 空间平均	474	11.2.5 量纲分析	527
10.4 弥散参数	475	11.2.6 检验分析	528
10.4.1 机械弥散系数和流体动 力弥散系数	475	11.2.7 改进的检验分析	530
10.4.2 介质的弥散度	479	11.3 砂槽模型	532
10.4.3 弥散度与渗透率的关系	483	11.3.1 概述	532
10.5 控制方程和边界条件	484	11.3.2 比例	534
10.5.1 在笛卡尔坐标系中的偏 微分方程	484	11.4 粘性流动模拟	540
10.5.2 在曲线坐标系中的偏微 分方程	486	11.4.1 概述	540
10.5.3 初始条件和边界条件	488	11.4.2 垂直Hele-Shaw模拟 装置的描述	541
10.5.4 解边值问题	490	11.4.3 建立模拟装置和原型之 间的相似性	543
10.5.5 无量纲变数的使用	491	11.4.4 垂直模拟装置的比例	545
10.6 几个已求得解的问题	492	11.4.5 垂直模拟装置应用介绍	548
10.6.1 一维流动	492	11.4.6 液体	549
10.6.2 平面上的均匀流动	497	11.4.7 水平Hele-Shaw模拟装 置的描述和比例	549
10.6.3 平面径向流动	499	11.4.8 无限大水平含水层的模拟	551
10.7 热量和物质的输运	505	11.5 电模拟	552
10.7.1 多孔介质中热量输运的 方式	505	11.5.1 电解槽模拟和导电纸模 拟的描述	552
10.7.2 描述流体连续介质中热 量和物质输运的方程	506	11.5.2 电解槽模拟装置的比例	556
10.7.3 描述多孔介质中热量和 物质输运的方程	507	11.5.3 用于稳定流动的电阻网 络模拟	558
10.7.4 关于几个热量和物质输 运系数的注释	510	11.5.4 用于非稳定流动的电阻- 电容网络模拟	562
10.7.5 宏观的热量输运方程和 物质输运方程的简化	512	11.5.5 离子运动模拟	565
10.7.6 对流和不稳定性	514	11.6 薄膜模拟	567
10.7.7 相似性	519	11.7 小结	568
第11章 模型和模拟	522	习题答案	571
11.1 概述	522	文献目录	575
11.2 确定模型和模拟比例的 原则和方法	524	索引	599
		英汉对照部分	599
		汉英对照部分	610

第1章 引 论

1.1 含水层、地下水与储油层

流体通过多孔介质的流动是多种工程及学科的分支，例如，地下水水文学、采油工程学、土壤学、土力学及化学工程学等等经常遇到的一个课题。虽然本书只论述与这些学科及工程领域有关的带有共同性的基本问题，但我们认为从介绍实践中常见的多孔介质及存在于其中的流体的典型例子来开始我们的讨论是恰当的。地下水水文工作者所研究的含水层以及采油工程师所研究的储油层都属于多孔介质的范畴。下面对含水层、储油层及存在于它们之中的流体做一简要说明。

1.1.1 定 义

含水层（即地下水盆地）是具有下述两种性质的地层或岩层：（a）含有水，（b）在一般的野外条件下允许大量的水在其中运动。Todd（1959）曾追溯过含水层这一术语的拉丁语由来；在拉丁语中含水层是由aqua和-fer构成的，aqua的意思是“水”，-fer来自ferre，意思是“提供”。

阻水层与含水层相反，是一种可以含水，甚至大量含水，但在一般野外条件下不能大量导水的地层。粘土层就是一个例子。从实用的观点来看，阻水层可以认为是不透水的地质层。

与含水层相比，弱含水层是一种导水速度十分缓慢的半透水地质层。但是，如果在大的水平范围内，相邻含水层之间有弱含水层存在，则弱含水层可以大量导水。这种弱含水层通常称为越流地层。非含水层是既不含水又不导水的地层。

地下水系指地面以下的所有的的水。然而，由于地下水水文工作者主要研究饱和带中的水（§1.1.2），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，这个术语还表示潜水面以上不完全饱和地层中的水。在本书中，我们利用地下水这一术语主要表示饱和带中的水。

岩石中没有被固体颗粒占据的那一部分叫做空隙空间（或孔隙空间、孔隙、空隙、裂隙）。空隙空间含有水和（或）空气。在地层内只有连通的空隙才能起导水通道的作用。图1.1.1（据Meinzer 1942）表示岩石空隙的几种类型。空隙的大小可以从巨大的石灰岩洞穴变化到水主要靠吸着力存在于其中的微小的亚毛细孔洞。岩石的空隙一般分为两种：（a）原生空隙，主要在沉积岩与火成岩中，是岩石形成时的地质作用产生的；（b）次生空隙，主要是节理、裂隙和岩溶通道，它们是在岩石形成以后逐渐发展而成的。

1.1.2 垂直剖面上的水分分布

地面以下的水在垂直剖面上的分布可以按照空隙空间中 含水的相对比例划分 成两个

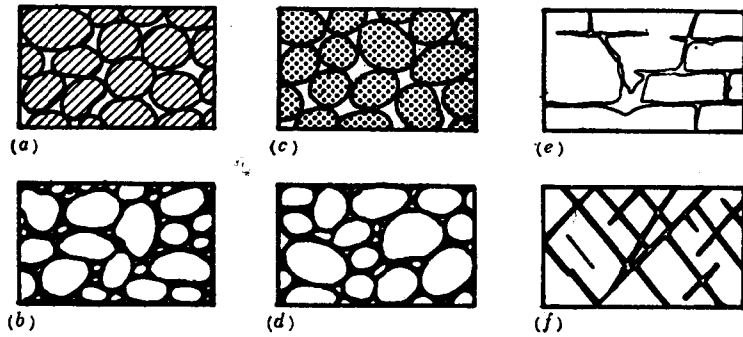


图 1.1.1 岩石孔隙的几种类型

(a)分选好、孔隙率高的沉积物；(b)分选差、孔隙率低的沉积物；(c)砾石组成的沉积物，砾石本身也是多孔的，因而整个沉积物的孔隙率很高；(d)沉积物分选好，但颗粒间有胶结物沉积，所以孔隙率低；(e)由溶蚀作用形成的多孔岩石；(f)由断裂形成的多孔岩石（据Meinzer, 1942）

带：饱和带与充气带。饱和带中的全部空隙充满着水。充气带位于饱和带之上，其中同时包含着气体（主要是空气及水蒸气）和水。

图1.1.2表示地面以下水的分布概况。水（例如大气降水和(或)灌溉水）自地面渗入，在重力作用下向下运动和聚集，最后在某些不透水地层之上充满岩石中所有相互连通的空隙。这样就在不透水地层之上形成了饱和带。饱和带的上界面为潜水面（图 1.1.2）。潜水面是一个其表面上压力等于大气压力的面。如果井孔打入基本上为水平流动的含水层中（§ 6.6），则井孔中的水面就是潜水面。实际上，饱和带要高出潜水面一定距离，这距离的大小与土的种类有关（§ 9-4-2）。井、泉和某些河流靠来自饱和带的水补给。

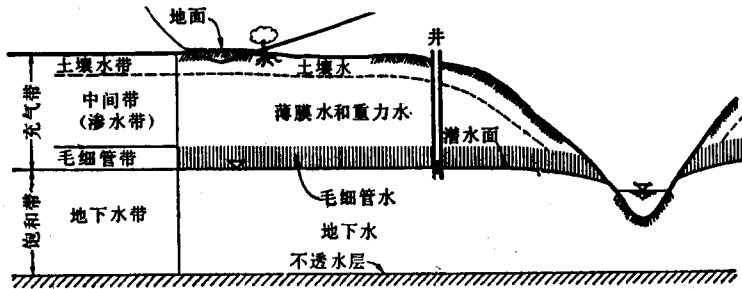


图 1.1.2 地面以下水的分布

充气带从潜水面延伸至地面。它通常由三个亚带，即土壤水带、中间带（或渗水带）和毛细管带组成。

土壤水带邻近地表，向下延伸通过植物根系带。该带水分分布不仅受降水、灌溉、空气温度及湿度季节性变化和日变化等地表条件的影响，而且受埋藏浅的潜水位的影响。在渗水期（例如降水、地面洪泛和灌溉时期，§ 9.4）该带水向下运动，而蒸发与植物的蒸腾作用则使该带的水向上运动。在过量渗水的短时期内，该带土壤可以暂时完全为重力水所饱和。

在土壤表面没有供水的情况下，经长期排水之后残留于土中的水分的含量叫做野外容水率（§ 9-4-3）。在野外容水率以下的土壤中包含着毛细管水。毛细管水靠表面张力保

持在土壤颗粒周围形成连续水膜。此种水在毛细作用下运动，对植物有用。当水分含量小于吸湿度的时候，土壤中所含的水称为吸着水。所谓吸湿度就是在20°C时使原来的干土与相对湿度为50%的大气接触所能吸收的最大水分含量。由于吸着水形成极薄的薄膜牢固地粘附在土颗粒表面，因而对植物无用（图9.4.2）。

中间带自土壤水带的下缘延伸至毛细管带的上缘。如果潜水面太高，致使毛细管带扩展到土壤水带，或甚至达到地表时，中间带便不复存在。中间带中停滞着的水（即薄膜水）靠附着力及毛细力保持在孔隙中。重力水可以暂时通过该带向下运动。

毛细管带自潜面向上扩展。其厚度取决于土的性质及孔隙大小的均匀性。毛细上升从粗粒物质中的实际上等于零变化到细粒物质（例如，粘土）中的2~3米或更高。关于毛细上升问题我们将在§9.4里详细讨论。通常，毛细管带内的水分含量随着距潜水面高度的增加而逐渐减小。稍高出潜水面的孔隙实际上是饱和的；再向上，只有较小的、连通的孔隙含水；在更高的地方，能被水饱和的只是那些连通的最小的孔隙。因此，毛细管带的上界具有不规则形状。实用上取某个平均的光滑曲面作为毛细管带的上界面（§9.4.2），而在这曲面以下可以认为土是饱和的（比方说>75%）。

在毛细管带中，压力小于大气压力，水可以发生水平流动及垂流。当潜水面以下饱和带的厚度比毛细管带大得多时，通常忽略毛细管带中的流动。但在许多排水问题中，非饱和带中的流动具有重要意义。

很明显，上述的水分分布剖面是从孔隙大小的多变性、透水地层的存在以及暂时性渗入水的运动等许多复杂情况概括出来的。

1.1.3 含水层的分类

下面根据Thomas的著作（1952）对作为含水层的某些地层作一简要描述。

大多数含水层是由非固结或部分固结的砂砾石组成。它们分布在废、古河道，平原和山谷之中。一些含水层的面积有限，而另一些则分布的范围很大。它们的厚度也可以从几米变化到几百米。

砂岩和砾岩是砂和砾石固结的产物。在这类岩石中，由于颗粒被胶结在一起，故渗透性减小。

在世界的许多地方，厚度、密度、孔隙率和渗透性有很大变化的石灰岩地层是重要含水层，尤其在大部分原生石灰岩被溶蚀迁移的时候。石灰岩中的洞穴可以从微小的原生小孔变化到形成地下河道的大裂缝及大洞穴。由于水流沿断层及裂隙溶解岩石，因而随着时间的推移，它们被不断扩大，从而增大了岩石的透水性，最后石灰岩地区发展为岩溶（喀斯特）地区。就大范围而言，喀斯特含水层的宏观性状大致与砂砾石含水层相似，但从小范围来看，相似性能否成立还是一个问题（§1.2）。图1.1.1e和1.1.1f表示溶蚀与断裂所形成的多孔性岩石。

火山岩可以构成含水层。玄武岩是相当好的含水层。玄武岩含水层的孔隙也许比松散砂砾石含水层小，但由于大多数孔隙具有连通的特点，故其渗透性可以比砂砾石含水层大很多倍。以岩床、岩脉和岩颈等形式出现的许多浅层侵入岩，渗透性都很小，其中绝大多数不透水，因此可以作为地下水流的阻隔边界。

结晶岩与变质岩属于相对不透水层，它们构成弱含水层。当这类岩石出现在地表附近

时，由于风化与破碎，渗透性会逐渐变大。

粘土及粘土与粗粒物质的混合物，虽然孔隙率一般很高，但由于孔隙小，故为相对不透水层。

含水层可以看成是受降水和河流自然补给或通过井孔及其它人工方式补给的地下水水库。含水层中的水可以通过泉和河流自然地排泄，也可以用人工方法从井中排出。

含水层的厚度及其它垂向尺寸通常比所研究的水平长度小得多。因此在本书中表示含水层中流动的所有图形都不是按比例绘制的，读者不应当由此而产生误解。

含水层可以根据潜水面是否存在划分为无压含水层和承压含水层两大类。

承压含水层又叫压力含水层（图 1.1.3）。这种含水层的上部和下部均为不透水地层所封闭。当井孔揭露承压含水层时，水位会上升到封闭层底面以上，有时甚至达到地表。结构合理的观测孔（即测压孔）应当有一个比较短的过滤器部分，但与孔隙相比又不是太短（参阅 § 1.3），只有这样它才能表示出某给定点，譬如说，过滤器中心点的测压水头（§ 3.3）。打入含水层的许多观测孔中的水位确定了一个假想的面，这个假想的面就叫做测压面或等压面。如果含水层中的流动基本上为水平流动，那么等势面是垂直的，此时测压孔打入含水层中的深度并不重要。否则，测压孔深度的标高不同，得到的测压水位也不一样。幸而，除了在非完整井或泉之类的出水口附近以外，含水层中的流动基本上是水平的。

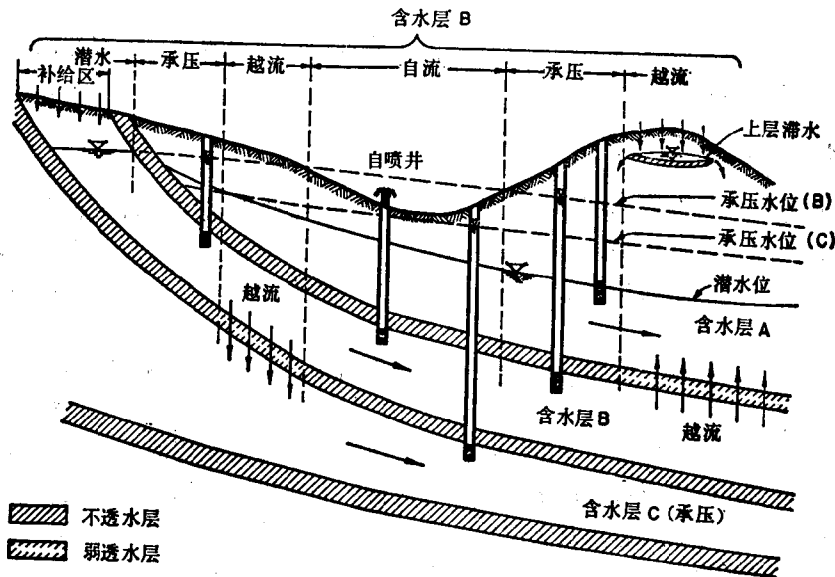


图 1.1.3 含水层的类型

自流含水层是一种测压面高度（比方说，相对于封闭层底面的高度）高出地表的承压含水层或承压含水层的一部分。因为这种含水层中的井孔在不抽水的情况下也会自由出流，所以称为自流井或自喷井。有时候人们也用自流含水层这一术语表示承压含水层。

地表水和大气降水通过承压含水层在地表出露的地区，或通过不透水层在地下尖灭而使承压含水层变为无压含水层的地区流入承压含水层。这样的地区通常称为补给区。

潜水含水层又叫无压含水层。它是一种具有潜水面的含水层。潜水含水层的上部边界就是潜水面。潜水面以上为毛细管带。在地下水研究中毛细管带通常是忽略不计的。除了

在潜水面和地表之间局部存在水平不透水地层的地区以外，潜水含水层的补给一般来自其上的地表。

不论是承压含水层还是无压含水层均能通过其上或（和）其下的封闭地层获得水或漏失水，这种含水层叫做越流含水层。虽然这类封闭地层具有较高的渗透阻力，但是当它们在大范围内与所研究的含水层接触时，大量的水可以通过它们流入或流出含水层。在各种情况下，越流量与越流方向均受弱透水地层两侧测压水头差的控制。显然，在每一种具体条件下，决定含水层上覆的某个地层是不透水层，还是弱透水层或仅仅是渗透性与所考虑的含水层不同的另一种透水地层并不是一件容易的事。通常，考虑成弱透水层的地层（即越流层）都比主含水层的厚度小。

位于弱透水地层之上的潜水含水层（或其一部分）是一种有越流的潜水含水层。至少有一个弱透水封闭层的承压含水层（或其一部分）叫做有越流的承压含水层。

图 1.1.3 表示几种含水层和观测孔。上部为潜水含水层，其下有两个承压含水层。在补给区，含水层 B 变为潜水含水层。含水层 A、B 和 C 的一部分是有越流的；越流方向及越流量的大小取决于每个含水层的测压水面高度。由于潜水位和承压水头高度的变化，各含水层承压和无压部分之间的界线可以随时间而变化。潜水含水层的一种特殊情形是上层滞水含水层（图 1.1.3）。当在潜水面和地面之间分布有局部不透水（或相对不透水）地层时，在这种不透水地层之上就会形成另一种地下水体——上层滞水含水层。沉积物中的粘土及亚粘土透镜体上经常有薄的上层滞水含水层。有时，这些含水层只能存在一个比较短的时间，因为上层滞水可以流入下部的潜水含水层。

1.1.4 含水层的性质

含水层的导水、贮水和给水这些一般性质在数量上是通过若干含水层参数来定义的。关于这些参数的详细分析将在本书的不同章节给出。这里我们扼要地描述一下其中的某些参数，目的在于补充说明上面给出的含水层的定义。

水力传导系数表示在水力梯度作用下含水层传导地下水的的能力。它是多孔介质和其中流动着的流体的一种组合性质（§ 5.5）。如果含水层中的流动基本上为水平流动，则含水层的导水系数表示通过含水层整个厚度的导水能力。导水系数等于含水层的水力传导系数与含水层厚度的乘积（§ 6.4）。

含水层的贮水系数表示存贮在含水层中的水量变化和相应的测压面（或无压含水层的潜水面）高度变化之间的关系。

承压含水层的贮水系数定义为水头降低（或升高）一个单位时，从水平横截面积为一个单位的含水层垂直柱体中释出（或存入）的水的体积（§ 6.3，§ 6.4）。图 1.1.4 a 说明这个概念。承压含水层的贮水性质是由水的压缩性和作为整体的含水层的弹性引起的。固体颗粒和微粒等的弹性一般可忽略不计。关于这些问题将在第六章中详细讨论。

在潜水含水层中，除了降低的是潜水面这一点以外，上面给出的贮水系数的定义本质上没有变化。但是，造成含水层柱体内贮存水量变化的机理却不相同。在潜水含水层的情况下，水实际上是由于潜水位降低而从空隙空间中排出并为空气所代替。然而，重力排水（譬如说，由抽水所引起的地下潜水位降低）并不能排出包含在空隙空间中的全部水。一定量的水在分子引力与表面张力的支持下能够抗住重力而保持在固体颗粒之间的空隙