

孔隙裂隙弹性 理论及应用导论

白 矛 刘天泉 编著



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

国家自然科学基金重点项目(批准号 59634030)资助

135152

TE312

014

孔隙裂隙弹性 理论及应用导论

白 矛 刘天泉 编著



石油大学0135084

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了孔隙裂隙弹性理论发展概况,以及相关的基础知识;并给出了孔隙弹性介质的数学描述,以及各种孔隙度模型参数的确定方法和通用方程;还分别论述了应用积分变换法进行的解析分析,以及应用有限元法对流体耦合作用的稳态分析和瞬态分析。书中对这一理论在石油、采矿和地下岩土工程中的应用以及有关专题作了详尽的阐述,展示了许多有学术意义的研究结果和工程应用实例,是一本填补了我国在这一学科领域空白的专著。

本书可供石油、采矿、岩土工程、环境工程等领域的科研、教学人员及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

孔隙裂隙弹性理论及应用导论/白矛,刘天泉编著.

北京:石油工业出版社,1999.10

ISBN 7-5021-2833-6

I. 孔…

II. ①白…②刘…

III. ①孔隙度-弹性理论②裂缝-弹性理论

IV. TE312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 66063 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 5.25 印张 103 千字 印 1—1000

1999 年 10 月北京第 1 版 1999 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2833-6/TE·2216

定价:10.00 元

Introduction to Dual- Porosity Poroelasticity

by Bai Mao

Rock Mechanics Institute

University of Oklahoma

Norman, Oklahoma, U.S.A.

and

Liu Tianquan

China Coal Research Institute

Beijing, China

Petroleum Industry Press

序

由白矛博士和刘天泉院士共同编著的《孔隙裂隙弹性理论及应用导论》是一本既具有重要理论意义又具有工程应用价值的科技专著。

孔隙裂隙弹性理论是目前研究流体或热流体在裂缝性非均匀多孔介质中流动的基本理论。这一理论在英国、美国、加拿大、澳大利亚等国家得到了较好的发展，并在工程应用中发挥着越来越大的作用。尤其是双重孔隙介质流固耦合研究，在石油工程、地下水工程、地下热工程领域得到了极大的重视和发展。

双重孔隙介质的概念是为了研究流体在裂缝性非均匀多孔介质中的流动而于1960年由Barenblatt首先提出的。他认为裂缝性多孔介质的每一代表性体积单元中，同时存在裂缝孔隙和基质孔隙，并且认为裂缝是流体的主要流动通道，其孔隙度小而渗透性高；基质孔隙是流体的主要储存空间，孔隙度高而渗透性低，一般说来，裂缝与基质孔隙之间存在流体交换。双重孔隙介质理论是借助于连续介质理论的研究方法和成果，研究裂缝性介质最成功的典范之一。1963年经Warren和Root改进后首先应用于石油工程。以此为标志，开始了双重孔隙介质理论及其应用的研究。那时的模型还只是研究流体在刚性不变形的多孔介质中的流动。作为研究裂缝性孔隙介质中流体流动与固体骨架变形作用的双重孔隙介

质流固耦合理论的提出还是最近 20 年的事。Aifantis 于 80 年代初基于混合物理论推导出了双重孔隙介质单相流体流固耦合的基本方程。从此揭开了双重孔隙介质研究的新热潮。随后,两相流体、多相流体在双重孔隙介质中流动的流固耦合作用,热弹塑性双重孔隙介质流固耦合作用,非线性渗流的双重孔隙介质流固耦合作用等研究方向相继得到发展,工程应用领域也日益扩大。

国内目前对双重孔隙介质的研究正处于发展阶段,特别是双重孔隙介质流固耦合的研究更处于初期阶段,与国际先进水平还有较大的差距,其发展潜力很大,尤其在工程应用领域更是如此。然而,国内迄今还没有介绍双重孔隙介质理论及其应用的专著。无疑,这本专著的出版填补了我国在这方面的空缺。本书共分 9 章,第 1、2 章介绍了孔隙裂隙弹性理论发展的历史和概况以及有关的预备知识。第 3、4 章则给出了孔隙介质的数学描述和各种孔隙度多重渗透率模型及通用方程,其中包括双重孔隙、多重孔隙的概念及多重渗透率的概念。对各模型系数的定义和确定方法进行了详尽的阐述。第 5、6 两章分别介绍了应用积分变换法进行的解析分析,以及应用有限单元法对流固耦合作用的稳态分析和瞬态分析。第 7、8 两章则对这一理论在地下采矿、石油测井和岩土工程中的应用以及有关专题进行了详尽的阐述,给出了许多有意义的研究结果和工程应用实例。第 9 章给出了有关结论。本书还对目前孔隙介质理论与应用的新发展作了介绍。对于需要了解孔隙裂隙弹性理论及其应用的读者无疑是一本很好的参考书。我们期望这

本专著能对这一学科领域在我国的发展起到促进作用。

徐秉屹

清华大学教授

1999年4月

前 言

早在 1941 年，比奥（Biot）就提出了孔隙弹性理论，半个多世纪过去了，这个理论得到了很大的发展，大量文献相继发表，尤其可喜的是，这些简洁合理的理论模型已被广泛应用于工程领域，包括一些复杂的耦合问题，并广泛扩展到可变形孔隙介质中流体流动的微观机理。

然而，孔隙弹性理论在地下岩土工程中的应用仍然基于初始的理论假设。实际上，除比奥外，至今还没有第二个作者出版有关孔隙弹性理论与应用的专著。这也许是比奥先生对孔隙弹性理论研究及其在多门学科领域的深入理解与巨大贡献，而使其后继者即使站在巨人肩上，也难以摘到更多的果实，更不用说出版专著。

耦合现象和问题是最近 20 多年来才受到工程师和力学家重视的课题。据研究，世界上处于同一系统中的任何两个或两个以上的事物都是相互作用和彼此影响的。这就是耦合现象和问题。例如，建筑工程中高层结构同风的作用，航天、海洋、铁路工程中的高速运输系统，车辆引起的桥梁颤振、流体引起的管道振动、液体引起的储液容器的振颤等，都存在耦合现象和问题。处于同一环境中的地下岩土体及其内的液、气、热等物质，在外力作用下，地下岩土体的变形和液、气、热体的

运动，必然也会产生相互作用和彼此影响。煤矿的冲击地压、煤与瓦斯突出、底板大突水、井壁破坏、边坡稳定及地表大面积沉陷等地下岩土工程问题中，都存在不同的耦合现象和问题。

从力学观点看，流固耦合力学是流体力学与固体力学交叉而生成的科学。它是研究变形固体在流场作用下的各种行为以及固体位移对流场影响这二者交叉作用的科学。换句话说，耦合问题的特点就是两相介质之间的交互作用，即变形固体在流体的载荷作用下会产生变形或运动，而变形或运动又反过来影响流场，从而改变流体载荷的分布和大小。正是这种相互作用将在不同条件下产生种种流固耦合现象。

本书第一作者白矛博士在美国学习和工作期间，以煤炭和石油生产为背景，深入地研究了矿山和石油生产过程中的流固耦合现象与问题，获得了一系列重要成果，为解决地下岩土工程中的耦合问题奠定了良好的基础。近年来，他又与本书第二作者合作，结合煤矿岩土工程中出现的实际问题，开展了进一步的研究，以期对岩石力学研究寻求新的方法。

据本书作者研究，耦合作为一种共同的研究方法，具有重要的普遍意义，是当今渗流力学、岩土工程力学和计算力学研究和发展的方向。在当前的地下岩土工程中，它所辐射的科技问题主要有：

1. 采矿工程中，由于地下水流入矿井采区引起的地层沉陷；裂隙岩层和煤层中瓦斯的抽放；流体运动对露天矿边坡稳定性的影响；矿区水资源保护等。

2. 石油工程中，自然裂隙油层模拟；与应力有关的岩体渗透率与孔隙率；孔隙弹性体中油井的稳定性；生产出砂与孔隙塑性岩石力学；泥质岩石稳定与岩石物理性质的关系等。

3. 土木工程中，孔隙裂隙体中的土壤固结问题；抽排地下水引起的地表沉陷；隧道稳定与渗流和岩体变形的关系；部分饱和坝体的多相流问题等。

4. 环境工程中，孔隙裂隙岩体中污染的传播问题；污染物控制系统中的岩石力学问题；地下核废料处理中的热力学孔隙弹性分析；裂隙岩体井孔附近污染物的处理等。

众所周知，对于孔隙裂隙弹性理论，由于它固有的复杂性和它“表面看来”的应用局限性，使得这个理论的发展还处于初期阶段。作者近年来在双孔弹性理论及其在地下岩土工程中的应用方面做了一些工作，感到双孔弹性理论有其发展和应用前景，因而有必要编写一本有关双孔弹性理论及其应用的参考书，把孔隙弹性理论和双孔弹性理论的基本理论和方法介绍给我国的读者，作为学习和研究的基础，以期能促进这个理论的发展和技术的推广应用。

本书的写作是在国家自然科学基金重点项目“煤矿上覆岩移动与破坏研究”（批准号：59634030）的资助下进行的，部分内容曾在煤炭科学研究总院、中国石油大学（北京）、中国矿业大学（北京校区）和清华大学作过介绍，受到了听众的欢迎与好评。对于读者而言，只要对必要的固体力学、孔隙介质中渗流力学知识、边

界元、有限元和偏微分方程及其解的知识有所了解，则对理解本书的内容极为有益。本书第一作者非常感激他的导师 D. Elsworth 博士对他的指导和帮助。由于研究工作刚刚开始，加上作者水平有限，不足之处，请读者指正。

刘天泉 煤炭科学研究总院（北京）

白 矛 俄克拉何马大学（美国）

1999 年 10 月

目 录

1. 概述	(1)
1.1. 文献述评	(1)
1.2. 耦合过程	(4)
1.3. 孔隙裂隙弹性理论研究的必要性	(5)
1.4. 孔隙裂隙弹性概念	(6)
1.5. 应用	(8)
2. 预备知识	(11)
2.1. 符号习惯和数学记法	(11)
2.2. 基本假设	(14)
2.3. 固体力学中的位移法和应力法	(16)
2.4. 非线性流动和线性输送之间的相关性	(16)
2.5. 经典双孔隙度概念的剖析	(19)
3. 孔隙弹性介质的数学描述	(24)
3.1. 孔隙弹性理论公式的演绎	(24)
3.2. 经典单孔孔隙弹性模型	(27)
3.3. 双孔孔隙弹性理论：裂隙介质的延伸	(28)
3.4. 三孔孔隙弹性理论：大裂隙介质的 进一步拓展	(30)
3.5. 多孔孔隙度/多渗透率模型	(33)
4. 参数分析	(34)
4.1. 单孔隙度模型	(34)

4.2. 双孔隙度模型	(36)
4.3. 物理参数的确定	(39)
5. 解析法	(44)
5.1. 拉普拉斯变换	(44)
5.2. 傅立叶变换	(51)
5.3. 汉克尔变换	(53)
6. 数值法	(60)
6.1. 稳态分析	(60)
6.2. 瞬态分析	(71)
7. 应用	(79)
7.1. 地下采矿	(79)
7.2. 油井试井	(85)
7.3. 岩土工程	(99)
8. 专题	(108)
8.1. 各向异性孔隙裂隙介质	(108)
8.2. 热力孔隙弹性耦合及其在固结问题中的 应用	(116)
8.3. 非等温孔隙裂隙体中污染物传播	(129)
9. 结论	(141)
参考文献	(142)

Contents

1. Introduction	(1)
1.1. A general literature review	(1)
1.2. Coupled processes	(4)
1.3. Need for a dual-porosity poroelastic approach	(5)
1.4. Concept of dual-porosity poroelasticity	(6)
1.5. Utilities	(8)
2. Preliminary knowledge	(11)
2.1. Sign convention and mathematical notations	(11)
2.2. Assumptions	(14)
2.3. Displacement based and stress based methods in solid mechanics	(16)
2.4. Correlation between nonlinear flow and linear transport	(16)
2.5. An in-depth look at classical dual-porosity concept	(19)
3. Mathematical formulation of poroelastic media	(24)
3.1. Origin of a poroelastic formulation	(24)
3.2. Classic single-porosity poroelastic model	(27)

3.3. Dual-porosity poroelasticity: an extension for fractured media	(28)
3.4. Triple-porosity poroelasticity: a further extension for highly fractured media	(30)
3.5. Multi-porosity/multi-permeability model ...	(33)
4. Parametric analysis	(34)
4.1. Single-porosity	(34)
4.2. Dual-porosity	(36)
4.3. Physical parametric identification	(39)
5. Analytical schemes	(44)
5.1. Laplace transform	(44)
5.2. Fourier transform	(51)
5.3. Hankel transform	(53)
6. Numerical schemes	(60)
6.1. Steady state analysis	(60)
6.2. Transient analysis	(71)
7. Applications	(79)
7.1. Underground mining	(79)
7.2. Petroleum well tests	(85)
7.3. Geotechnical engineering	(99)
8. Special topics	(108)
8.1. Anisotropic dual-porosity poroelasticity	(108)
8.2. Thermoporoelastic coupling with application to consolidation	(116)
8.3. Contaminant transport in nonisothermal	

fractured porous media	(129)
9. Conclusions	(141)
References	(142)

1. 概 述

为具有不同学科背景的读者方便，下面介绍一些基本知识，重点强调对力学机理概念的理解。

1.1. 文献述评

作为一门学科，流体在孔隙裂隙介质中的流动规律研究，已经发展近 40 年。这个领域的开创性工作当属 Barenblatt 等人在 1960 年做出的。他们提出了以唯象学为基础的双孔模型。起初，他们的工作没有引起人们的注意，直到 1963 年 Warren 和 Root 提出一个基于 Barenblatt 模型的简化模型应用于油层模拟，Barenblatt 的工作才被研究人员注意到。Warren 和 Root 的简化工作极大地激发了油藏工程师对具有天然裂隙的油层的模拟。在发表的众多相关文献中，较有影响的文献有：① Kazemi (1969) 和 Deswaan (1976) 提出的裂隙与孔隙之间的隙际不稳定流动；② Crawford 等 (1976) 认为在实际试井工程中的瞬态压力梯度变化是双孔相互作用特征的表现；③ Bourdet 等 (1984) 在用压力导数法 (Pressure derivative method) 进行试井解释时，进一步证实了油层的双孔特性。此外，Kamal (1983), Gringarten (1984) 和 Chen (1989) 也发表了一些重要