

巴晶 编著

Progress and Review of Rock Physics

岩石物理学进展与评述

清华大学出版社

Progress and Review of Rock Physics

岩石物理学进展与评述

巴晶 编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书围绕岩石的力学、弹性、波传播与衰减、孔隙结构、流体分布等特征,阐述了等效介质理论、波传播理论、岩石物理实验中的各方面内容,包括:方法起源与发展、数值分析与模拟、实验装置与原理、测量结果与经验关系、技术与工业应用等,对存在的问题、发展趋势、应用前景进行了评述。

本书可供固体地球物理学、勘探地球物理学、声学、力学、应用数学等领域的科研与教学人员参考,也可从事资源勘探、测井、岩土工程工作的工程师参考,还可作为大学高年级学生和研究生相关专业的辅助教材。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

岩石物理学进展与评述/巴晶编著. --北京:清华大学出版社,2013
ISBN 978-7-302-31914-6

I. ①岩… II. ①巴… III. ①岩石物理学—研究 IV. ①P584

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 074784 号

责任编辑:朱红莲 洪 英

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:24.5 插 页:4 字 数:594 千字

版 次:2013 年 9 月第 1 版

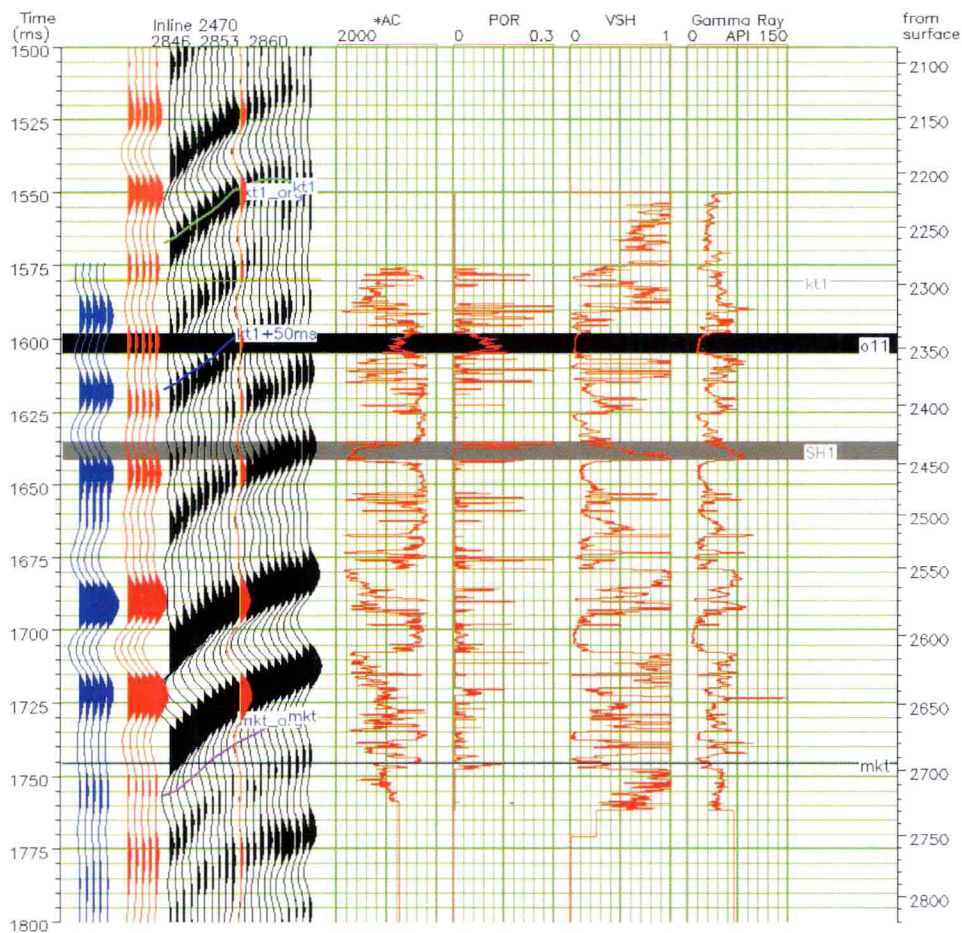
印 次:2013 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

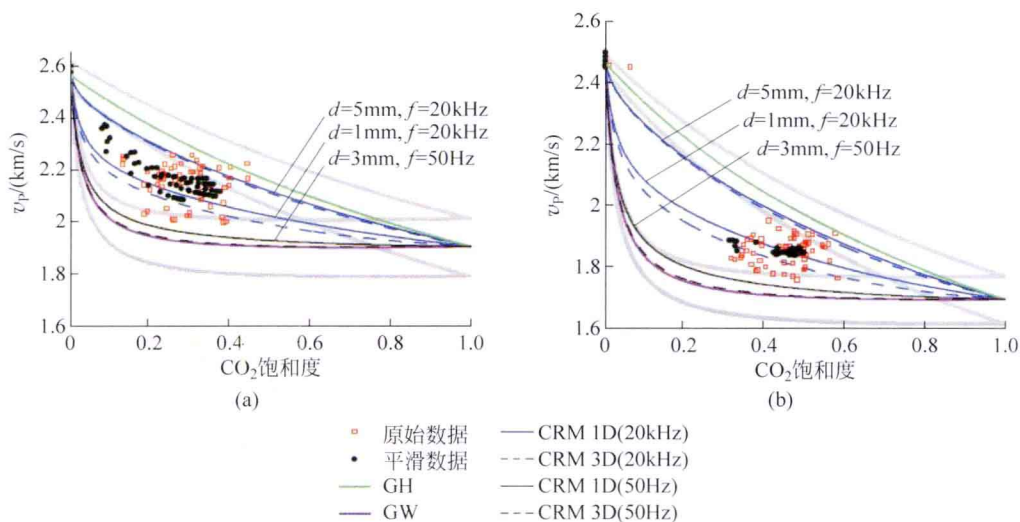
定 价:68.00 元



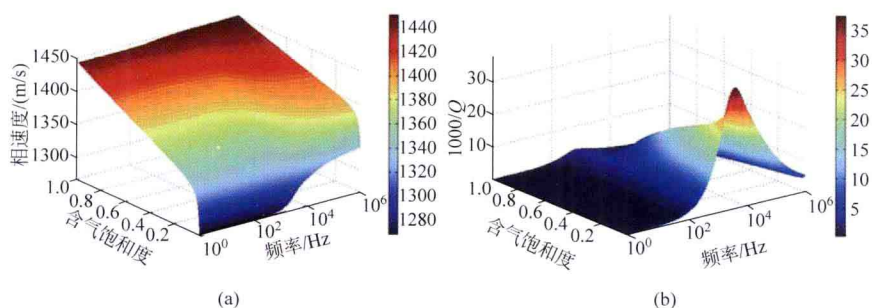
产品编号:043048-01



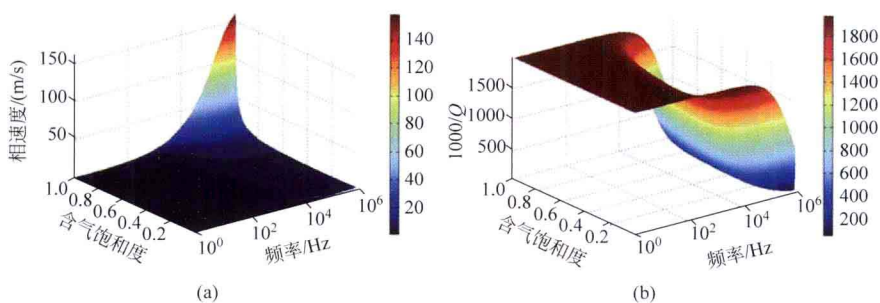
彩图 2-18 阿姆河地区某井合成记录、井旁道与相关测井曲线



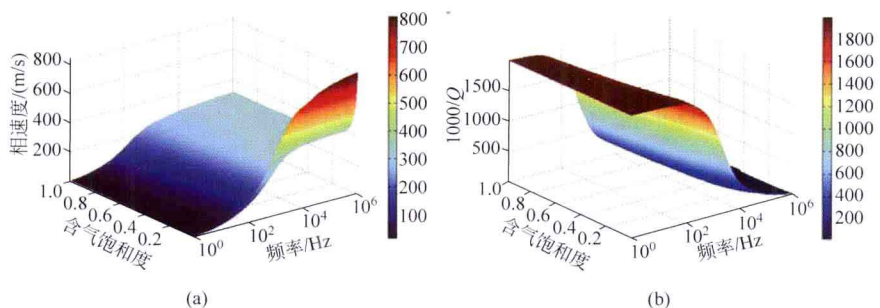
彩图 5-55 理论模型(BGW 边界、BGH 边界、连续随机介质 CRM)与两个深度范围内的测井实际数据的对比
(a) 1114.1~1114.6m; (b) 1116.2~1116.7m
灰色曲线给出了 BGW 与 BGH 边界的偏差(由测井数据的标准差算出)



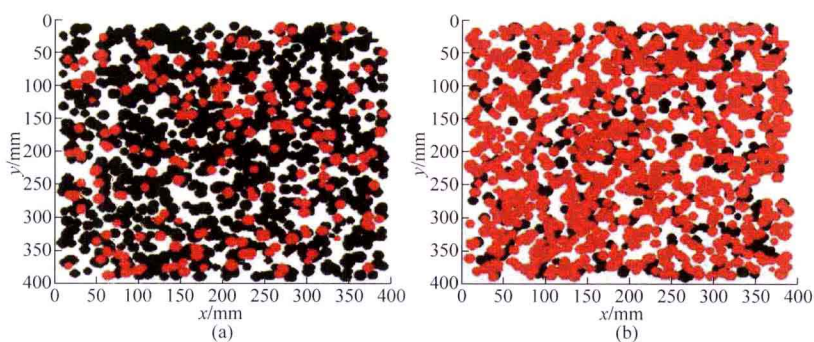
彩图 5-68 含气饱和度与频率对 R1 波相速度(a)与衰减逆品质因子(b)的影响
(赵海波,陈树民,李来林,吴清岭,2012)



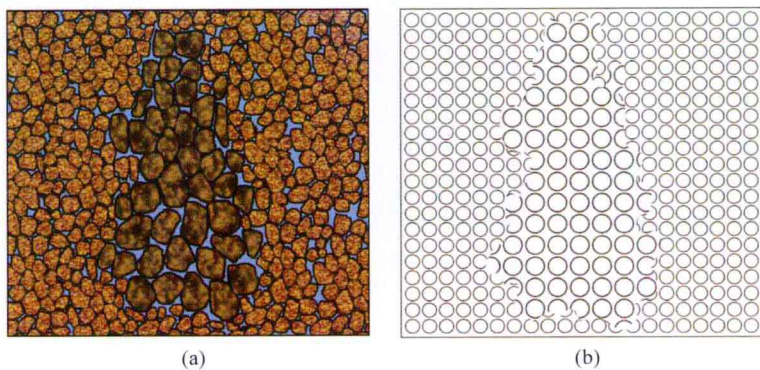
彩图 5-69 含气饱和度与频率对 R2 波相速度(a)与衰减(b)的影响(赵海波,等,2012)



彩图 5-70 含气饱和度与频率对 R3 波相速度(a)与衰减(b)的影响(赵海波,等,2012)

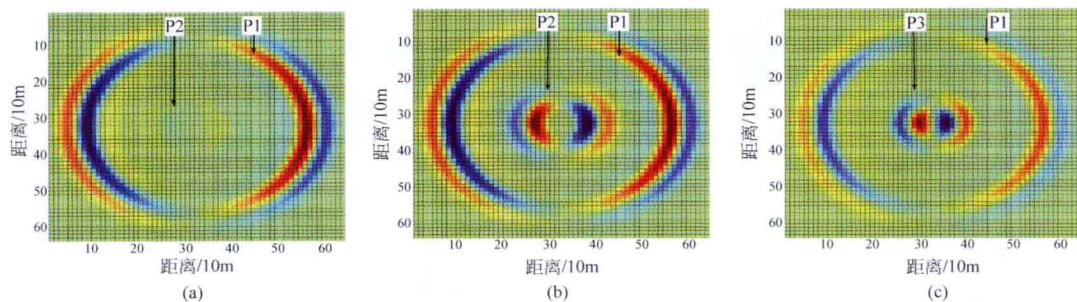


彩图 5-74 含三种孔隙流体且流体随机分布的岩石模型(王东,王秀明,张海澜,2006)
(a) 水、油、气饱和度分别为 0.2、0.7、0.1; (b) 水、油、气饱和度分别为 0.2、0.1、0.7



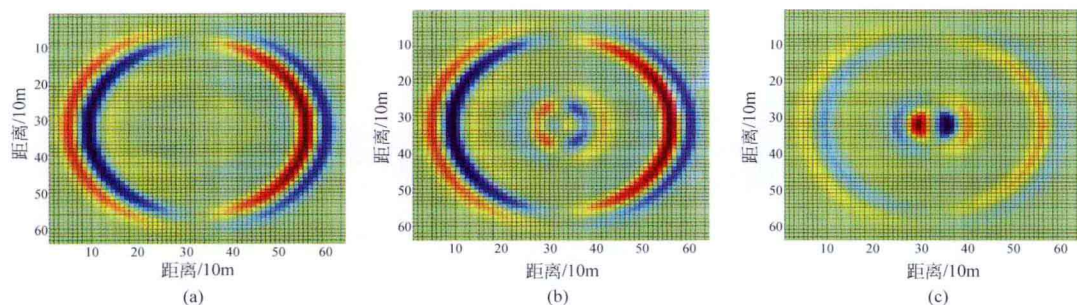
彩图 6-15 含两种不同类型孔隙的岩石骨架及简化的双孔介质模型示意图

(a) 由两种不同颗粒按中观尺度非均匀性构架而成的双孔岩石($10^{-3} \sim 10^{-1} \text{m}$)；(b) 简化近似的双孔介质模型



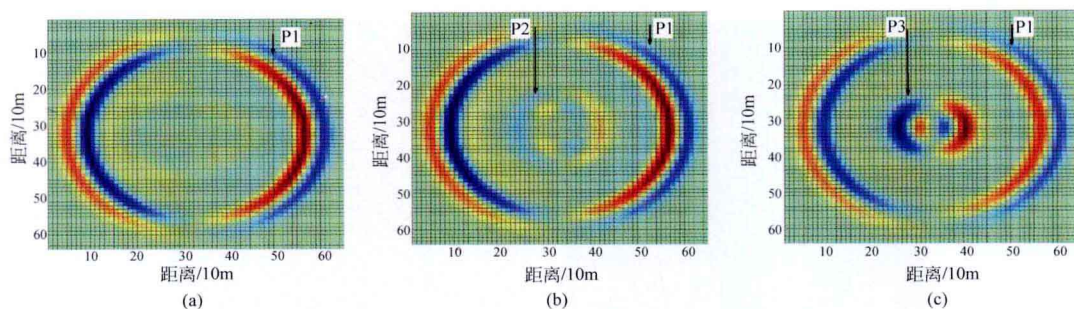
彩图 6-16 模型 6-1 于 80ms 在 X 方向的位移波阵面

(a) 固相位移波阵面；(b) 第一类孔隙液相波阵面；(c) 第二类孔隙液相波阵面



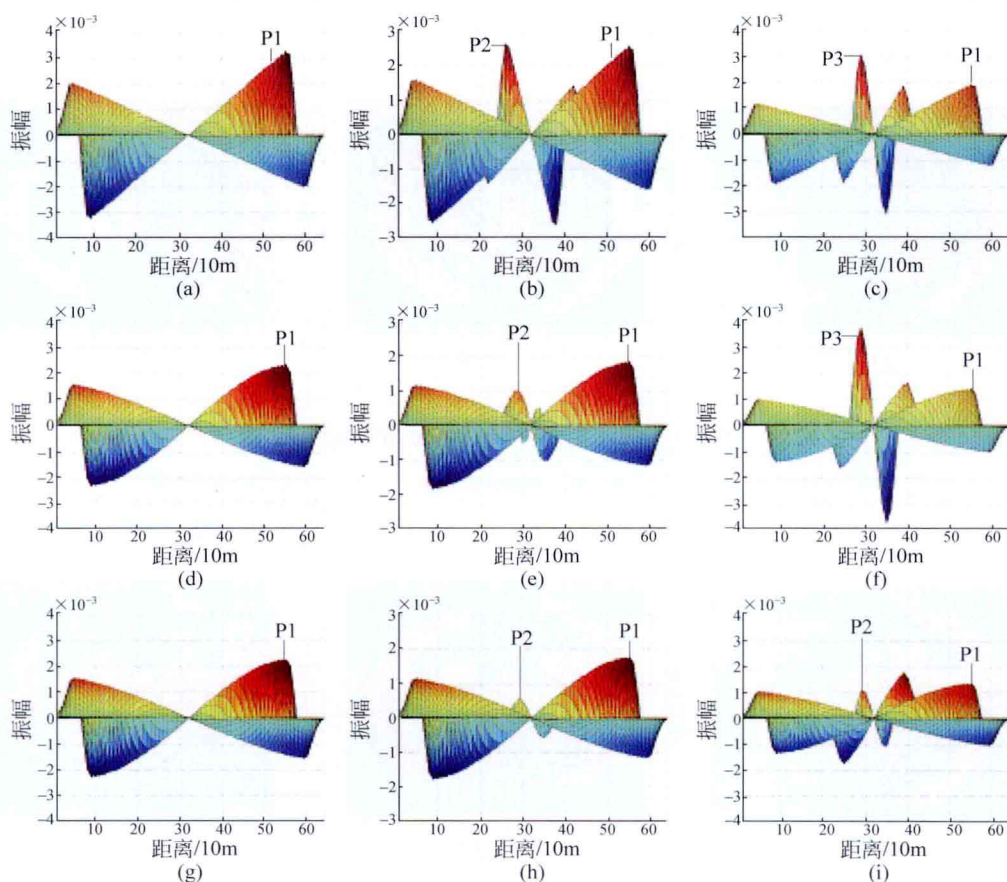
彩图 6-17 模型 6-2 于 80ms 在 X 方向的位移波阵面

(a) 固相位移波阵面；(b) 第一类孔隙液相波阵面；(c) 第二类孔隙液相波阵面



彩图 6-18 模型 6-3 于 80ms 在 X 方向的位移波阵面

(a) 固相位移波阵面；(b) 第一类孔隙液相波阵面；(c) 第二类孔隙液相波阵面

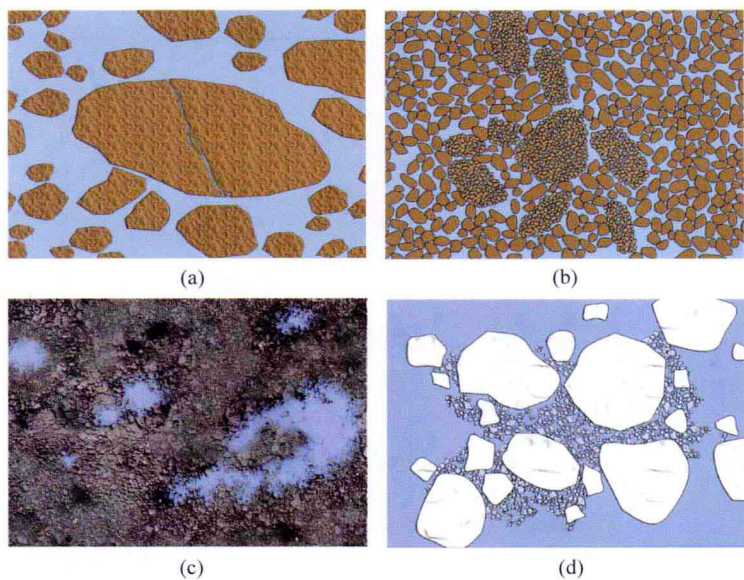


彩图 6-19 模型 6-1~模型 6-3 于 80ms 位移波阵面“振幅-传播方向”切面

(a) 模型 6-1 固相, (b) 模型 6-1 第一孔隙液相, (c) 模型 6-1 第二孔隙液相；

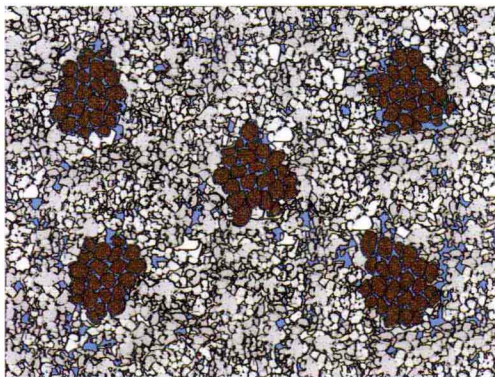
(d) 模型 6-2 固相, (e) 模型 6-2 第一孔隙液相, (f) 模型 6-2 第二孔隙液相；

(g) 模型 6-3 固相, (h) 模型 6-3 第一孔隙液相, (i) 模型 6-3 第二孔隙液相

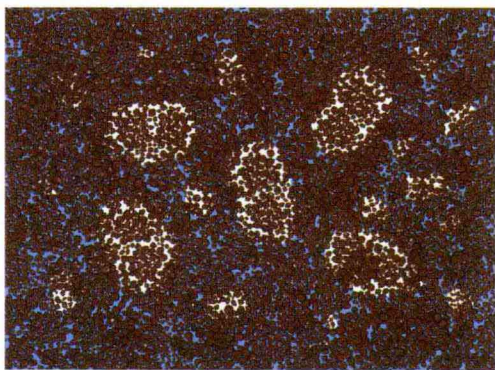


彩图 6-30 自然界的 4 种双重孔隙介质示意图(Ba,等,2011)

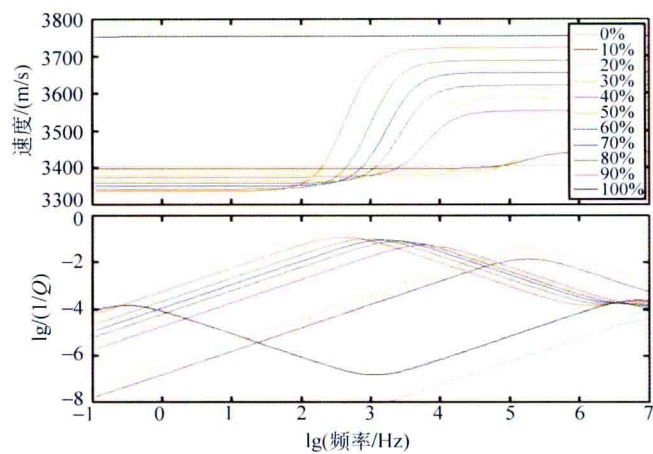
(a) 微米量级尺度下,晶体裂缝与粒间孔隙形成双孔结构;(b) 大颗粒组成岩石主骨架,小颗粒在局部形成的补丁状嵌入体;(c) 在遭受强烈溶蚀作用的白云岩中,粉晶与泥残留在溶孔内部,形成第二类岩石骨架;(d) 部分溶化的冰块中,冰水混合物填充入疏松接触的冰块缝隙,与主骨架形成双重孔隙结构。



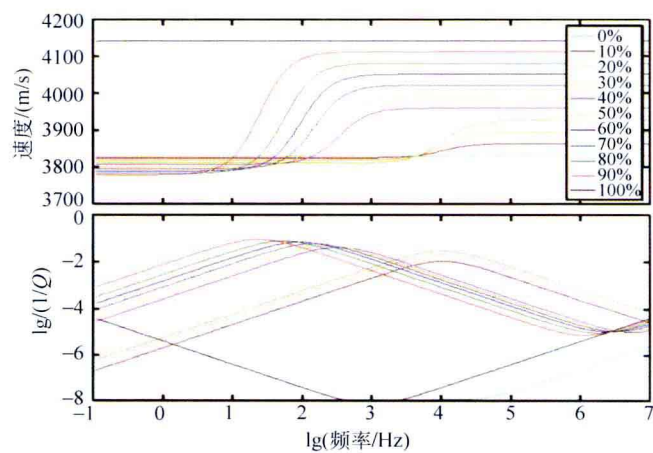
彩图 6-39 仅饱和水的非均匀砂岩中的双重孔隙结构示意图(两种骨架,一类流体)



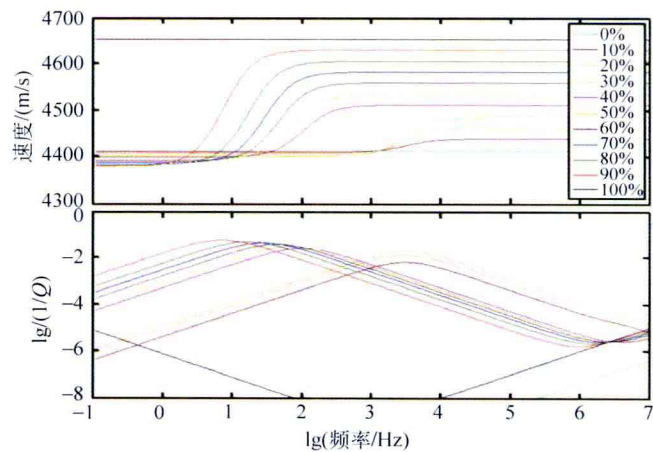
彩图 6-40 非饱和砂岩中的双重孔隙结构示意图(一种骨架,两类流体)



(a)



(b)

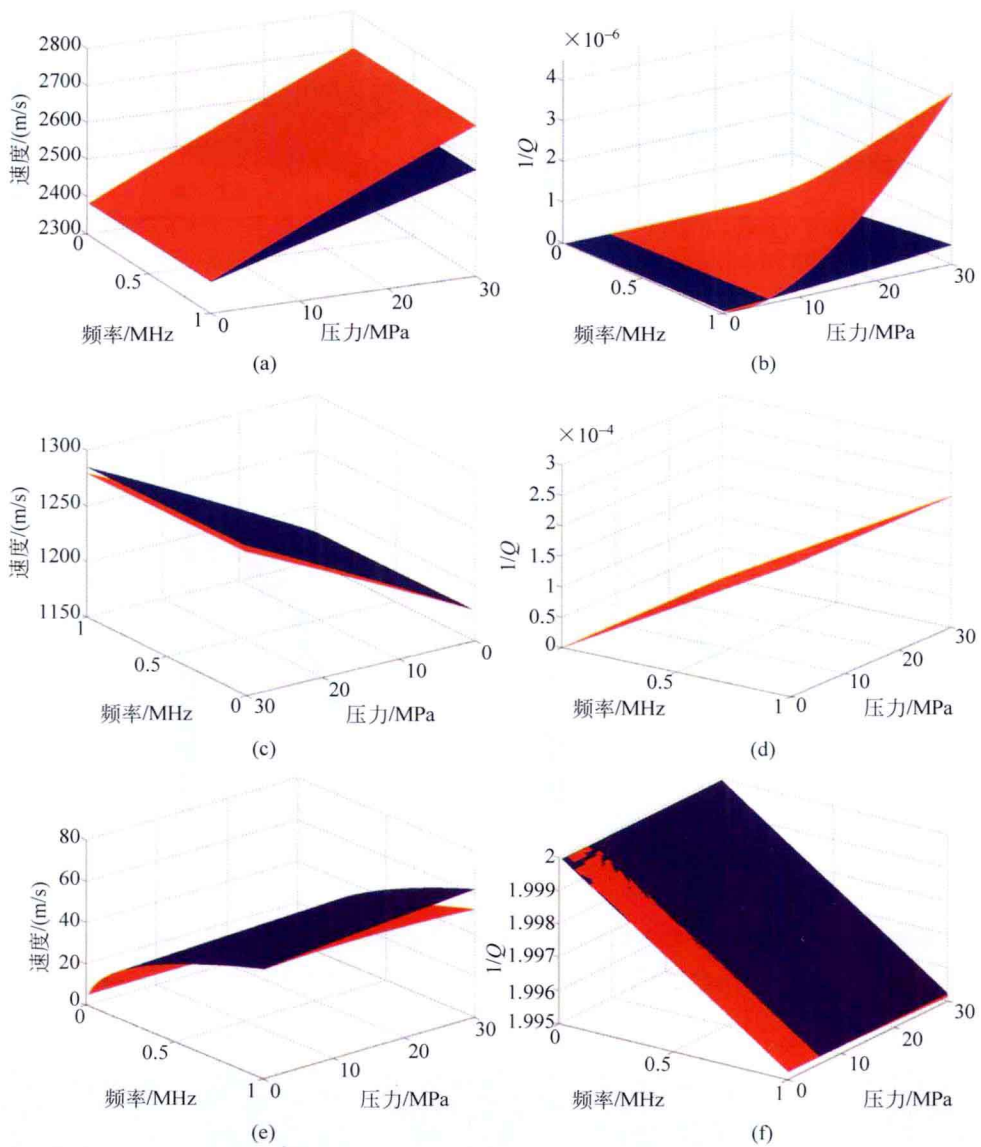


(c)

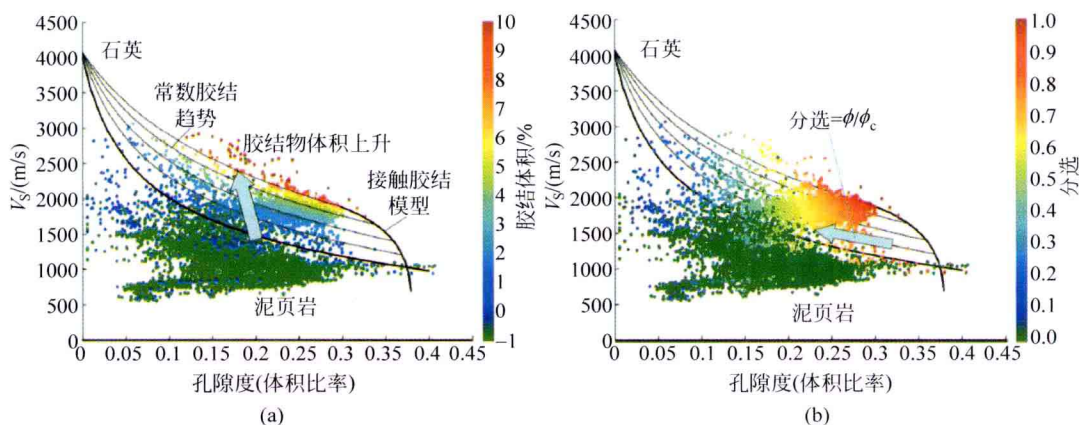
彩图 6-42 变孔隙度砂岩中的地震波频散与衰减

(a) 样本 1, 孔隙度 0.11; (b) 样本 2, 孔隙度 0.0757; (c) 样本 3, 孔隙度 0.0439

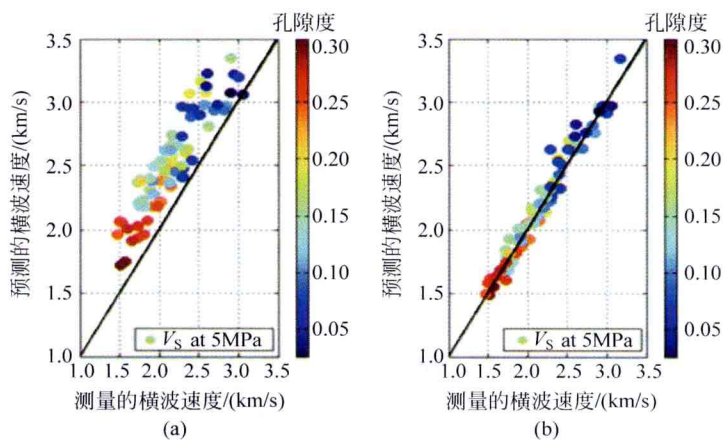
图中标签所示 0%~100% 表示岩石中的水饱和度



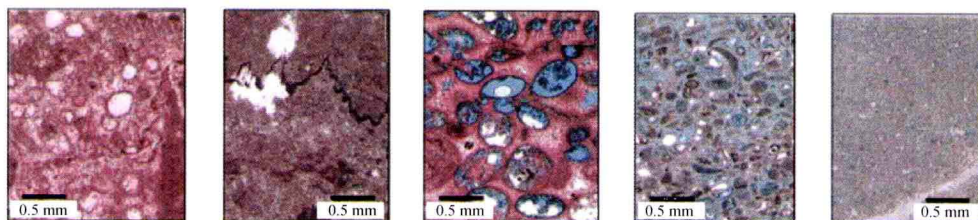
彩图 7-19 静水压实验中弹性波速度与衰减随压力、波频率的变化关系(Ba,等,2012)
 (a) 快纵波速度; (b) 快纵波衰减; (c) 横波速度; (d) 横波衰减; (e) 慢纵波速度; (f) 慢纵波衰减
 图中红色曲面表示开口实验结果; 蓝色曲面表示闭口实验结果



彩图 8-34 横波测井数据与常数胶结模型的对比 (Avseth, 等, 2010)
图中绿色散点表示泥岩; 不同曲线对应不同胶结物含量下常数胶结模型的计算结果



彩图 8-39 75 块砂岩中模型预测的横波速度与实验结果的对比 (Zhang, Li, Yao, 2012)
(a) 临界孔隙度模型; (b) 可变临界孔隙度模型



彩图 9-11 碳酸盐岩岩芯薄片 (Adam, Batzle, Brevik, 2006)
粉红色表示方解石; 灰色表示白云石; 白色表示石膏; 蓝色表示孔隙空间

前言

自 20 世纪 90 年代以来,随着油气勘探开发工作的深入,油公司的主要勘探目标由构造型油气藏逐渐转向岩性油气藏,在“十一五”至“十二五”期间,被认为是拥有巨大潜力的非常规油气资源开始受到业界的高度重视。然而,非常规资源物理特征复杂,储层物性普遍较差,对其进行有效利用必须支撑以强大的勘探开发技术。目前,常规地震勘探工程中使用的各类储层预测、流体检测方法,其根本出发点源自对目的层岩性、物性、结构、流体等信息的了解与描述。为进一步推进此类技术从定性走向定量,并满足日益复杂的勘探目标需求,岩石物理学的基础理论、实验与方法,受到勘探地球物理学界的普遍关注,成为研究热点。

作为一门交叉学科,岩石物理学研究的主要手段来自相邻领域,其各类基础理论、实验方案、经验关系较为繁多,且近二十年来,基于不同研究目的、根据不同假设、采用不同数学原理的新成果纷繁复杂。当前,岩石物理学的各类基础研究成果要在进一步的科研与生产中得到有效应用面临一定困难。本书的主要目的是归纳与回顾岩石物理学研究的重要进展,讨论各类结果与方法的特点与适用范围,阐明其缺陷,并展望未来的发展动向。

本书第 1 章从波传播理论、等效介质理论与岩石物理实验三个方面回顾了半个世纪以来岩石物理学研究的发展历程与趋势,讨论了工程应用中岩石物理学面临的问题。第 2 章介绍了黏弹性理论的起源与基本模型,介绍了孔隙介质 Biot 理论及其黏弹性的延伸,着重阐述了黏弹性理论的唯一性及局限性。第 3 章介绍了弹性各向异性介质理论的基本模型及其延伸,分析了裂缝诱导各向异性模型,讨论了各向异性理论的工程应用问题。第 4 章介绍了 BISQ 理论的产生与发展,分析了这种理论的优点及其局限性。第 5 章从力学模型、近似方法、数学模拟三个角度介绍了非饱和介质波传播理论的各类研究案例,阐述了非饱和波动研究中存在的难点。第 6 章介绍了双重孔隙介质理论中的数学推导、波场模拟、实验分析等内容,阐述了这种模型在描述局部流机制方面的合理性与有效性,给出了 Biot-Rayleigh 理论及其相关的延展内容。第 7 章介绍了岩石中非线性声弹性理论研究的一些进展,给出了完备的孔隙声弹性理论方程及其相关的实验结果。第 8 章重点介绍了岩石中等效介质理论、颗粒接触理论、颗粒胶结理论的研究案例,讨论了相关模型的工程应用前景,并介绍了几种典型的经验与半经验模型。第 9 章从中、低频段实验数据测量、非饱和岩石声波与弹性参数测量、岩石尾波与衰减分析三个方面介绍了岩石物理实验的一些基础设备与新研究进展。

本书主要面向勘探地球物理学的工程问题,因此,所讨论的核心围绕岩石的矿物、孔隙、流体与岩石的整体弹性、波动特征的联系,并不涉及岩石的电性与磁性特征。由于本书的内容主要与理论、实验方面的基础研究成果有关,因此对天然地震学、岩土力学、材料工程等领域的一些科学问题的研究也有参考意义。

在完成本书的过程中,许云教授协助对书稿进行了审校。本书得到了赵文智、邹才能、陈志勇、姚逢昌、张研、史譔等专家的悉心指导,并得到曹宏、Carcione J M、Müller T M、聂

建新、孙卫涛、杜启振、杨顶辉、符力耘、魏修成等学者的指导与帮助,在此一并谢忱。此外,作者想将谢意致以一直默默支持作者研究工作的家人,祝愿母亲健康。

本书工作受国家自然科学基金项目(41104066)、国家“973”项目(2007CB2095)、中国石油“十二五”基础研究项目(2011A-3601)、勘探院中青年创新基金项目(2010-A-26-01)资助。

本书编写之初,曾期望用更为简洁、明晰、有序的框架完成对岩石物理学研究成果的整理,但实际操作时,却发现这一想法是很难实现的。书中不妥和错误之处,请读者指正。

巴 晶

2013 年春于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 岩石物理学的范畴	1
1.2 岩石物理学的理论	2
1.2.1 等效介质理论	2
1.2.2 波传播理论	7
1.3 岩石物理学的实验	12
1.3.1 实验观测手段	12
1.3.2 岩石物理实验研究	13
1.4 工程应用中岩石物理学面临的问题	18
第 2 章 黏弹性理论的发展及应用	20
2.1 黏弹性理论的基础与发展	20
2.1.1 理想弹性、理想黏性与黏弹性	20
2.1.2 黏弹性理论的基本模型	22
2.1.3 黏弹性理论的发展	24
2.2 黏弹性理论的新进展	28
2.2.1 杨氏谐振 Q 模型及其应用	28
2.2.2 Biot 理论与孔隙黏弹性介质理论	36
2.2.3 孔隙岩石骨架的黏弹性	43
2.2.4 孔隙岩石中流体的黏性	55
2.3 黏弹性理论的“瓶颈”所在	60
第 3 章 岩石物理学中的各向异性介质理论	62
3.1 岩石内部各向异性介质模型	62
3.2 各向异性介质理论的新进展	64
3.2.1 各向异性黏弹性介质模型	64
3.2.2 双相各向异性介质模型	75
3.2.3 双相各向异性介质中的黏弹性：骨架与流体	89
3.2.4 裂缝诱导各向异性	99
3.3 各向异性介质理论的工程应用与难点	108

第 4 章 BISQ 理论及其发展	111
4.1 BISQ 理论的产生与基础	111
4.2 BISQ 理论的拓展与实现	122
4.2.1 横向各向同性介质中的 BISQ 理论	122
4.2.2 Diallo 尝试对基本的喷射流方程进行的改进	126
4.2.3 BISQ 理论及地震波场模拟	129
4.3 BISQ 理论的优点及其缺陷	148
第 5 章 非饱和岩石波传播理论、预测与实验	150
5.1 非饱和岩石波动问题的基本模型	150
5.2 非饱和岩石波传播理论的发展	157
5.2.1 Dutta 对 White 理论的改进	157
5.2.2 Johnson 等的动态渗透率理论及分支函数模型	165
5.2.3 水平气、水交替层状介质模型的进一步研究	178
5.2.4 气、水非饱和和岩石的三维模型	191
5.2.5 气(油)、水、固三相介质的 Santos 理论	201
5.2.6 仅基于 Biot 理论模拟非饱和和介质的波场	210
5.3 非饱和介质波动理论面临的困难及其价值	212
第 6 章 双重孔隙介质波传播理论	214
6.1 双重孔隙介质波传播理论的发展	214
6.2 双孔介质波传播理论的推导、验证与实现	222
6.2.1 双孔介质波传播方程	224
6.2.2 双孔介质理论与前人理论的相容性	231
6.2.3 双孔介质理论的弹性波场模拟	237
6.2.4 双孔介质中的纵波速度频散	247
6.3 Biot-Rayleigh 理论	254
6.3.1 双孔介质 Biot-Rayleigh 方程	254
6.3.2 Biot-Rayleigh 方程的推广: 由两种骨架、一类流体到一种骨架、 两类流体	267
6.4 双孔介质理论的发展趋势与潜在的应用前景	277
第 7 章 岩石中的非线性声弹性理论	279
7.1 岩石中的声弹性理论	279
7.1.1 固体介质中的声弹性理论进展及相关实验研究	280
7.1.2 岩石中的声弹性研究	285
7.2 岩石中的双相声弹性理论	293
7.2.1 双相介质的非线性弹性波传播方程	293
7.2.2 特定实验条件下的非线性弹性波速度	298

7.2.3 双相声弹性理论的数值结果	304
7.2.4 双相声弹性理论与实验观测的初步探索	308
7.3 岩石中声弹性理论的发展	310
第 8 章 岩石中的等效介质理论、接触与胶结理论以及经验组合模型的概述	311
8.1 岩石中的等效介质理论	311
8.1.1 计算复合物弹性模量上、下限的边界法	312
8.1.2 岩石中的各种自洽及静力学理论	314
8.1.3 基于散射波动力学分析的等效介质理论	317
8.1.4 岩石中的差分等效介质理论	323
8.1.5 岩石中等效介质理论的发展与应用	326
8.2 岩石中的接触与胶结理论	333
8.3 岩石中的经验模型与组合模型	336
第 9 章 岩石物理实验与观测研究的一些进展	342
9.1 岩石中的中、低频段实验观测研究	342
9.2 岩石中的非饱和实验观测研究	350
9.3 岩石超声实验中的尾波衰减与本征衰减	359
参考文献	362

第1章 绪 论

1.1 岩石物理学的范畴

岩石物理学始于 20 世纪 50 年代至 20 世纪 60 年代,是一门迅速发展起来的介于地球物理学、地质学、声学与力学等学科之间的交叉学科。如果细究岩石物理学研究中所用到的实验观测手段、理论分析方法与工程应用技术,岩石物理学还可能与其他更多的各级学科发生交集。但审视这门学科的产生与发展历程、所影响的受众群体以及实际应用领域,不难辨明与岩石物理学关系最为密切的几个领域为:固体地球物理学(地震学、地磁学、地电学、地热学),勘探地球物理学(测井学),地质学(构造学、沉积学、矿物学、勘探地质学),力学(固体力学、流体力学、断裂力学、材料力学)与物理学(声学、热学)等。

很多人认为岩石物理学的起源来自于岩石物理实验,并且因此得出了岩石物理学这门学科是一门彻底依赖于岩石实验观察与数据分析的学科的结论,然而回顾整个岩石物理学学科的发展历程,这一观点并不是充分的。客观地讲,几乎所有自然学科的产生都源自于人类对客观事物的观测与认知。在岩石物理学产生的过程中,各类的岩石实验观测确实是人类认识岩石的物理性质的一种重要手段,但作为一门衍生的交叉学科,岩石物理学在发展过程中的一些核心理论、方法与手段,却并不是直接从实验观测与分析中得到,而是由一些相邻学科的一些成熟认识引进、融合与归纳得到的。岩石物理学是一门同时依赖于实验与理论的学科,岩石物理学的重要成果,也不仅依赖于岩石采样的数量与覆盖次数,在纷繁复杂的实验数据与经验关系背后,物理学的基础理论的验证与应用,是令岩石物理学的定量认识“放之四海而皆准”的重要保障。

岩石物理学研究的问题主要包括:岩石的弹性、岩石中波的传播与衰减、岩石的孔渗特征、岩石的破裂与声发射特征、岩石的磁性、岩石的电学性质与岩石的热学性质等。在这个学科的发展过程中,受到产业部门、社会需求与工程实践的影响,实际上岩石物理学学科的发展热点,较多地集中在岩石的弹性与岩石的波传播问题当中,对岩石物理学的其他各方面研究却相对较少。这一现象的产生,与研究的产出、研究的经济目标及研究的商业价值有直接联系,也与交叉学科的发展规律及研究人员的自我主动性有关,体现了当今人类社会发展的实用主义思潮。

针对岩石中的力学特征、弹性特征、波传播特征、孔渗特征与结构特征的研究,与人类日常从事的地表建筑工程、岩土力学与材料工程、地震灾害预报与防御工程、矿产勘查与油气勘探工程乃至地球深部探测与构造地质研究等行为有着非常密切的联系,因此多年来,这一部分研究吸引了岩石物理学学科的大部分科研经费与人才投入。由此而来的“地震岩石物理”一词,则主要指研究岩石与矿物的物理特性,并探索其与勘探地震学与天然地震学之间的内