

地层吸收衰减 反演方法

ABSORPTION ATTRIBUTES INVERSION FROM SEISMIC DATA

刘浩杰 王延光·著

石油工业出版社

地层吸收衰减反演方法

刘浩杰 王延光 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书总结了地层吸收衰减研究方面的现状和一些新的方法,为广大的油气勘探开发人员
在储层描述和油气预测领域提供一些有价值的思路。本书从不同方面阐述了地层吸收衰减与
储层物性及流体性质的关系,进一步表明了地层吸收衰减在油气预测应用方面的可行性与可
靠性。书中介绍的 VSP 资料品质因子计算方法、井间地震 Q 层析成像方法、利用叠后地震
资料进行吸收衰减参数的计算方法、利用叠前地震资料进行常规弹性参数与吸收参数的联合
反演方法在油气预测实践中取得了较好效果,值得推广应用。

本书可供从事油气预测的油田勘探开发科技人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

地层吸收衰减反演方法/刘浩杰,王延光著.
北京:石油工业出版社,2015.9
ISBN 978-7-5183-0824-8

I. 地…

II. ①刘… ②王…

III. 油气藏-地震勘探-研究

IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 176767 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523533 图书营销中心: (010) 64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 10.75

字数: 280 千字

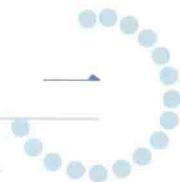
定价: 98.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

序

Foreword



物探技术在油气勘探开发中发挥了重要的支撑作用。早期,主要利用地震波的运动学特征进行构造解释。现阶段,随着物探技术的进步和计算能力的提高,利用地震波的动力学特征进行储层物性和流体性质的预测成为研究的热点。地震响应特征和油气藏目标的复杂性对地震储层描述及油气预测技术提出了更高要求,需要地球物理科技工作者不断提出新的思路,形成新的地震储层描述及油气预测方法。

地震波在地层中传播时的吸收衰减性质与储层的岩性、物性、流体成分和环境因素等有非常密切的关系,对地震资料的分辨率、振幅和相位有重要的影响。前人基于不同的假设条件,提出和研究了不同的地震波衰减理论模型和吸收衰减参数计算方法。这些方法和技术在储层物性及油气预测应用方面的进展,表明地层吸收衰减理论和反演方法的研究及应用,是今后地球物理技术发展的重要方向之一。

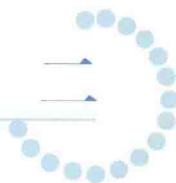
《地层吸收衰减反演方法》一书,系统总结了近年来作者在地层吸收衰减领域的研究新进展,阐述了在地层吸收衰减理论、井间地震吸收衰减参数反演、VSP吸收衰减参数计算、地面地震叠后吸收衰减参数计算、地面地震叠前吸收衰减参数反演等方面所取得的多项研究成果。特别是叠前吸收衰减参数的高精度反演,能够利用叠前不同角度道集的地震资料直接反演储层的常规物性参数和吸收衰减参数,实现了从弹性反演到黏弹性反演的转变,拓宽了叠前地震反演的思路 and 实现方法。

该书是作者长期在该领域潜心研究的成果结晶。书中既有对传统吸收衰减参数方法的介绍,也有作者及其团队研发的各种新方法,且在勘探开发实践中进一步提高了储层描述及油气预测的精度,取得了较好的应用效果。这对于地球物理技术研究人员具有重要的参考价值和借鉴作用。

2015年9月9日

序二

Foreword



随着我国东部地区油气勘探工作的不断深入,以构造圈闭为主的勘探目标越来越少,而地层、岩性等主要勘探目标隐蔽性也变得更强,导致勘探难度增加。要保持勘探工作的可持续发展,地球物理预测、识别技术需要适应形势,加快发展,发挥不可替代的作用。

很高兴看到刘浩杰、王延光两位同行编著的《地层吸收衰减反演方法》一书,给我们讲述了吸收衰减油气预测这一物探前沿技术的创新和应用。书中既有传统吸收衰减计算方法的发展和应用,又有地层吸收衰减理论、叠前吸收衰减参数高精度反演等新的思路和方法,内容全面、丰富、新颖。这是新形势下地质与物探、引进与创新、正演和反演相结合的成功实例之一。该技术的不断完善和推广应用必将为勘探研究人员提供更好的手段,促进油气勘探成功率的提高。

希望本书能够为广大的油气勘探开发研究人员提供相应的借鉴和启发,促进多学科领域的学术交流,推动我国地球物理事业的进步,更好地服务于油气的勘探开发。

宋明如

2015年9月12日

前言

Preface

地震资料中蕴含着极为丰富的储层物性及流体特征信息。如何从地震资料中提取更加多样、更加准确、更加精细的油气藏信息是地震勘探技术所面临的机遇和挑战。

非均匀黏弹性介质中地震波的吸收衰减作为一种与油气属性密切相关的地震属性近年来越来越受到国外众多的研究机构和石油公司的重视。许多地球物理工作者在地层的吸收衰减方面进行了大量的研究，提出了许多有关衰减的理论和计算方法，取得了许多重要成果。大量的研究表明，影响多孔介质地震波衰减的主要因素包括地层的岩性、物性、流体和环境等，而且衰减属性比波速等其他弹性参数对地层性质和组分变化的反应更为敏感。因此，研究地层吸收特征参数的横向和纵向变化，对于提高地震资料分辨率、储层流体识别、AVO 效应、时移地震油气藏检测等都有重要意义。

针对吸收衰减油气预测这一前沿技术方向，中国石油化工集团公司科技部专门设立了系列重点科技攻关项目，如《多尺度资料联合地层吸收衰减研究及应用》、《低频地震岩石物理测试方法研究》等，助推了该项技术的研究。

近 5 年来，笔者围绕着与吸收衰减有关的关键问题开展了大量研究和探索：地层吸收衰减参数与储层物性及流体性质的理论关系是什么？如何利用井中地震资料求取井位置处准确的吸收衰减参数？如何利用叠后地震资料准确求取三维空间的吸收衰减参数？如何利用叠前地震资料求取三维空间吸收衰减参数？如何综合纵波速度、横波速度、密度以及吸收衰减参数建立对储层和流体更为敏感的属性参数？通过笔者及其团队的努力，在地层吸收衰减理论和吸收衰减参数反演等方面获得了一些有意义的成果。在理论研究方面，建立了跨尺度地震岩石物理衰减理论模型，分析了地层吸收衰减参数的影响因素和油气敏感性，推导了地层吸收衰减参数与储层物性和流体性质的近似定量表达式。在 VSP 资料 Q 值计算方面，研发了全组合 Q 值最优化计算方法。在井间地震吸收衰减参数计算方面，提出了井间地震时频域联合 Q 值层析成像方法。在叠后吸收衰减属性计算方面，研发了基于广义 S 变换、Prony 滤波、基于 Teager 能量、基于瞬时地震子波等吸收衰减参数计算方法，实现了多技术和多属性参数的联合应用。在叠前地震资料吸收衰减参数计算方面，研发了叠前地震资料纵波速度、横波速度、密度、 Q 值等 4 参数反演方法，构建了新的黏弹性流体因子，探讨了黏弹性流体因子的直接反演方法。这些方法在油气预测实践中取得了较好效果。

为了更好地促进学术交流，推进技术的产业化应用，进一步提高我国的油气勘探开发水平，笔者对近几年在地层吸收衰减研究及油气预测应用方面的成果进行了总结，希望能

够抛砖引玉,引起更多油气勘探开发研究人员对于吸收衰减油气预测的重视,使之能够更好地为提高储层描述和油气预测精度服务。

本书共包括8章:第1章概述了岩石物理声波衰减研究现状,能够使读者了解地层吸收衰减的基本概念、基本理论,以及具体的实验室测试方法;第2章总结了含流体孔隙介质地震波衰减的基本理论,为地层吸收衰减油气预测的研究及应用奠定基础性认识;第3章从不同方面阐述了地层吸收衰减与储层物性及流体性质的关系,进一步表明了地层吸收衰减在油气预测应用方面的可行性与可靠性;第4章介绍了VSP资料品质因子计算方法;第5章介绍了井间地震 Q 层析成像方法;第6章主要阐述利用叠后地震资料进行吸收衰减参数的计算;第7章主要阐述利用叠前地震资料进行常规弹性参数与吸收参数的联合反演;第8章则总结了笔者研究中的一些认识和对未来研究及应用的思考。本书既有经典吸收衰减参数理论和计算方法的介绍,又有新研究成果的探讨,旨在总结地层吸收衰减研究方面的现状和一些新的方法,为广大的油气勘探开发人员在储层描述和油气预测领域提供一些可能有价值的方法和思路。

需要说明的是,由于地震信号影响因素、处理过程、各种方法实现过程,乃至地质因素的复杂性,笔者也不可能一一描述每种方法的适用范围及其精度范围,这需要研究及应用人员针对实际油气勘探区域做针对性的分析,选择合适的方法。

在本书的编写及整个研究过程中,中国石油化工集团公司科技部及胜利油田各级领导给予了大力支持和帮助。感谢中国石油化工集团公司科技部张永刚副主任、王国力处长、陈本池博士对项目研究一直给予的关心和支持。感谢胜利油田物探研究院孟宪军副院长、王兴谋副院长、夏吉庄首席专家和油藏室各位同事的指导与帮助。另外,还要感谢中国石油大学(华东)李振春教授、吴国忱教授、曹文俊副教授和宗兆云老师,中国海洋大学张建中教授、长江大学桂志先教授、中国石油大学(北京)张元中副教授等所给予的帮助!

感谢相关研究人员为此所付出的辛苦,他们是郑静静博士、毕丽飞博士,以及陈雨茂、李红梅、魏国华、李燕、李民龙、魏文等。

感谢中国首批“千人计划”特聘专家、中国石油大学(北京)李向阳教授和中国石油化工集团公司油气勘探高级专家、胜利油田副总地质师宋明水教授级高工在百忙之中通读了全书,提出了宝贵意见,并为本书作序。

由于笔者水平所限,书中难免出现不当之处,敬请各位专家、读者批评指正!

Contents

目 录

1 岩石物理声波衰减概述	(1)
1.1 声波衰减因素分析	(1)
1.2 声波衰减参数	(3)
1.3 声波衰减实验方法	(5)
2 孔隙流体地震波衰减理论	(8)
2.1 地震波衰减理论概述	(8)
2.2 流体流动地震波衰减机理	(9)
2.3 跨尺度岩石物理模型	(14)
3 地层吸收衰减与储层物性及流体性质的关系	(19)
3.1 吸收衰减理论模型分析	(19)
3.2 吸收衰减参数孔隙流体敏感性分析	(24)
3.3 基于黏弹正演模拟地层吸收衰减特征分析	(27)
4 基于 VSP 资料品质因子计算	(37)
4.1 VSP 技术及资料特点	(37)
4.2 频谱比法 Q 值计算方法	(38)
4.3 质心频移 Q 值计算方法	(43)
4.4 频谱匹配 Q 值计算方法	(43)
4.5 全组合最优化 Q 值计算方法	(44)

5 井间地震 Q 层析成像 (51)

- 5.1 井间地震技术及其资料特点 (51)
- 5.2 井间地震速度层析成像反演 (52)
- 5.3 频谱比法 Q 层析成像反演 (53)
- 5.4 质心频率偏移法 Q 层析成像反演 (54)
- 5.5 时频域联合速度和 Q 层析同步反演 (56)

6 叠后地震资料吸收衰减参数计算 (60)

- 6.1 叠后地震吸收衰减计算概述 (60)
- 6.2 广义 S 变换地层吸收衰减参数提取方法 (61)
- 6.3 Prony 滤波油气异常检测方法 (70)
- 6.4 峰值频率频移 Q 值计算方法 (74)
- 6.5 基于能量吸收衰减参数计算方法 (77)
- 6.6 瞬时地震子波吸收衰减参数计算方法 (81)
- 6.7 吸收衰减油气预测实际应用 (90)

7 叠前地震吸收衰减参数反演 (99)

- 7.1 叠前地震吸收衰减参数反演概述 (99)
- 7.2 叠前 CMP 道集吸收衰减参数计算方法 (100)
- 7.3 叠前地震“ $3+Q$ ”反演方法 (106)
- 7.4 黏弹性流体因子构建及叠前反演方法 (141)

8 地层吸收衰减反演认识与思考 (159)

参考文献 (161)

地震波传播的介质是地下岩石，油气预测的对象是地下岩石中油气的性质及分布状态。本章从微观角度，系统总结了岩石中声波传播衰减的因素，介绍了地震勘探中常用的声波衰减参数定义及其性质，分析了常用的实验室声波衰减测试方法，为地震波衰减性质的研究及油气预测应用提供认识和分析的基础。

1.1 声波衰减因素分析

岩石是一种多孔介质，有连通的孔隙空间，孔隙空间中充满流体，流体能够在孔隙空间中流动。

声波在地层岩石中传播时，其传播过程受到多种因素的影响，能量逐渐减弱。引起声波能量衰减的原因是多方面的。研究人员发现，在声波经岩石传播的过程中能量衰减主要有3种方式：声波的几何扩散衰减、声波的散射衰减，以及声波的吸收衰减。3种声波衰减的方式随着传播条件的不同而各不相同。第一类声波的几何扩散衰减，是波传播过程中本身具有的特性，与岩石特性的关系不明显；第二类声波的散射衰减，是由于岩石内部空隙、微裂纹等矿物粒子的不均匀性引起的声波能量损失；第三类声波的吸收衰减，主要是由于岩石介质的黏滞性、热传导、热弛豫等原因引起的能量损失。就实际应用而言，我们感兴趣的衰减不是与岩层几何形态及震源有关的外在成因的衰减（几何扩散、散射等），而是介质的内在成因衰减，即与地震波和多孔介质及其饱和流体之间相互作用有关的吸收衰减。

对衰减方式的分析和应用，主要是从宏观角度分析声波在岩石中传播的衰减因素。微观上，需要更深入分析声波在地层岩石中传播的衰减机理。国内外的学者对岩石声波衰减机理进行了很多理论探讨和实验研究。在声波经岩石传播衰减的过程中，主要提出的衰减机理包括以下几种：固相岩石颗粒间的相对滑动引起的能量损耗；固—液相孔隙流体流动和流体的黏滞性引起的能量损耗；热弹性效应及骨架本身非弹性引起的能量损耗；散射及几何扩散引起的能量损耗。在以上几种衰减机理中，散射、几何扩散引起的能量衰减是声波在岩石等介质中传播时本身所具有的特性，不反映岩石的本征衰减性质。以下对几种主要的衰减机制进行详细阐述。

1.1.1 岩石骨架固相颗粒的摩擦滑动

岩石骨架是由组成岩石的矿物颗粒和胶结物组成的。声波在岩石中传播过程产生的扰



动,将引起骨架颗粒间的相对摩擦,滑动摩擦阻力要消耗一定的声波能量,从而导致声波衰减。通过实验研究发现,摩擦衰减与频率有关。在20世纪60—70年代,人们认为岩石颗粒间的摩擦与相对滑动是地震波能量衰减的主要机制。实验室中对岩石样品的声学测量表明,摩擦衰减依赖于弹性应变,当弹性应变大于 10^{-6} 时才起作用。在地球物理勘探和实验室测量中,弹性波的衰减与应变无关(也就是应变小于 10^{-6})。在干燥岩石中,声波能量的衰减很小,而且与频率几乎是无关的。一般而言,岩石矿物颗粒间的摩擦与相对滑动不是能量衰减的主要机制。

1.1.2 固—液相孔隙流体和黏滞性引起的耗散

流体的黏滞性使岩石中传播的声波能量被吸收而引起衰减。大量研究表明,岩石中饱和的流体对声波能量的吸收,是引起声波衰减的主要原因。首先,流体的存在会对声波的能量进行吸收;其次,孔隙中流体的存在增加了岩石的黏滞性。当声波在岩石中传播时,孔隙中的流体与固体颗粒之间会产生相对运动,引起声波能量的吸收与耗散。

孔隙流体对声波衰减与频率之间关系有显著的影响。在不同声波频段内,流体饱和状态和流体分布不同,孔隙和裂缝中流体流动方式也不一样,导致声波衰减大小的差异。在超声频段内,以惯性流为主;频率比较低时,声波在岩石中的传播主要诱发一种所谓“进射流”。流体往往从小纵横比的裂缝流向大纵横比的孔隙,如流体由裂缝向孔隙进射或者由孔隙边缘向中心进射,这种衰减机制在超声频段内影响较小。当孔隙流体中含有气泡时,流体中的气泡会使流体在较小的压力梯度下就产生流动,引起声波能量的显著衰减。因此声波衰减对孔隙中气体的存在较为敏感。

1.1.3 岩石骨架非弹性引起的衰减

岩石不是一种完全弹性介质,而是一种黏弹性介质,岩石本身的黏性会对声波的能量进行吸收,使岩石介质产生应力弛豫特征,从而影响岩石中声波传播的速度、波形,并引起能量的耗散和损失。这种非弹性引起的衰减主要包括岩石介质的黏滞性、热传导及热弛豫等原因引起声波能量损失。

1.1.4 散射、反射引起的能量损耗

岩石由多种矿物颗粒所组成,是一种非均匀的介质。声波在岩石中传播时,有一部分能量的传播方向发生变化,使原传播方向上的能量减小,引起声波衰减,即散射衰减。衰减的大小与岩石成分、胶结情况、颗粒尺寸、孔隙度和饱和度等因素有关。散射衰减的一个显著特征是声波衰减系数与频率相关。根据波长与散射体尺寸的比值可以将散射衰减分为3种类型:漫散射、中间散射和瑞利散射。3种散射与频率有不同的关系。声波传播时的几何扩散也是造成声波衰减的另一个原因。当场点足够远时,有限大小的声源所辐射的声场类似于平面波扩散。该衰减总是存在于岩石测量中,却不反映岩石本身的本征性质,它是波动本身具有的特性,而且随着孔隙介质中的不同波动过程而有所差别。

需要说明的是,由于影响声波衰减的因素很多,声波衰减的各种机理也并不相互独立,而是相互联系,没有一种衰减机理能在任何情况下描述包括所有岩石中的衰减,因此,对

衰减的分类观测和准确确定十分困难, 只能通过突出一种或几种声波在岩石中传播时的能量损耗机理来加以研究。

1.2 声波衰减参数

获得岩石声学参数(声波速度、声波衰减参数)的方法有3种:地震勘探、声波测井和实验室超声测试。3种方法的工作频率各不相同,实验室条件下的工作频率是1MHz左右,属于高频;地震勘探的工作频率是10~200Hz;声波测井的频率是20kHz。3种方法的工作频率相差很大,波长不同,反映出的机理也存在差异。

在研究岩石声波衰减的过程中,人们定义了多个参数来表示岩石中声波传播时能量的耗散。这些参数从不同的方面,在不同的层次上描述了岩石中声波传播时能量损耗的定量特征,包括:声波衰减系数 α ,对数衰减 δ ,品质因子 Q ,主频偏移值 Δf 等。

1.2.1 声波衰减系数 α

考虑平面波的情况,假设声波在介质中的传播服从指数规律,在声波发射处的幅度为 A_0 ,声波速度为 v ,当传播到距声源为 x 以后,声波的幅度为

$$A(x, t) = A_0 e^{i\omega\left(\frac{x}{v}-t\right)} \quad (1-1)$$

式(1-1)中未考虑衰减。在考虑声波衰减的情况下,随着传播距离的增加,声波幅度降低与传播距离成正比,可以将(1-1)式表示为

$$A(x, t) = A_0 e^{i(kx - \omega t)} e^{-\alpha x} \quad (1-2)$$

式(1-2)表示声波经过传播距离 x 以后,幅度为 $A_0 \exp(-\alpha x)$,其中的 α 为声波衰减系数, k 为波数, ω 为圆频率。 $k = \omega/v$, $\omega = 2\pi f$ 。衰减系数可以作为声波衰减的一种量度,声波衰减系数表示单位距离上声波能量的吸收能量,单位: dB/m。

1.2.2 对数衰减 δ

在声波传播的路径上距声源有不同的两个位置 x_1 , x_2 ,其声波幅度分别表示为

$$\begin{aligned} A_1 &= A_0 e^{-\alpha x_1} \\ A_2 &= A_0 e^{-\alpha x_2} \end{aligned} \quad (1-3)$$

对(1-3)式取比值,并取自然对数可以得到

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \quad (1-4)$$

式(1-4)为单位长度上声波衰减的自然对数值,单位: dB/m。将上式表示成对数衰减为

$$\delta = \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) = \alpha (x_2 - x_1) \quad (1-5)$$

若记两点之间的距离为一个波长 λ ,则有 $\lambda = x_2 - x_1$,对数衰减表示为

$$\delta = \alpha \lambda, \quad \alpha = \frac{\delta}{\lambda} \quad (1-6)$$



从式(1-6)中可以看出,对数衰减 δ 是在一个波长上的声波信号的幅度变化的自然对数值。因此衰减系数与对数增量在反映声波衰减参数上的物理本质相同,即反映声波在传播路径上能量的衰减。

1.2.3 品质因子 Q

在岩石物理性质研究中,岩石的品质因子是一个重要的参数,可以用来评价岩石的性质,反映岩石中含流体的状态,对于油气的勘探具有重要的作用。品质因子 Q 值被定义为以下表达式的倒数,即

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta E}{E} \quad (1-7)$$

式中: ΔE 表示每个强迫振动周期中的能量损失; E 表示一个周期中的峰值能量密度。品质因子 Q 值可以用来表示能量的损耗, Q 值越大,表示传播过程中能量的损耗越小。

岩石为非弹性介质,模量 M 利用复数表示时,品质因子 Q 值为模量实部 M_R 与虚部 M_I 的比值,即

$$\begin{aligned} M &= M_R + iM_I \\ Q &= \frac{M_I}{M_R} \end{aligned} \quad (1-8)$$

衰减系数和品质因子 Q 的关系可以表示为

$$Q = \frac{2\pi}{1 - \exp(-2\alpha\lambda)} \quad (1-9)$$

当 α 较小时,品质因子 Q 值与衰减系数之间的关系为

$$Q = \frac{\pi f}{\alpha v} \quad (1-10)$$

式中: f 为入射波频率; α 为衰减系数; v 为声波速度。

1.2.4 主频偏移值 Δf

岩石对声波能量的吸收,使声波的主频产生偏移。对岩石声波衰减的实验研究表明,可以利用主频偏移值来表示岩石的声波衰减。对主频偏移值的定义基于傅氏变换,首先对声波探头对接波形或测量参考标准试件的波形进行频谱分析,得出准确的主频值,然后对声波经过岩样传播后的波形进行频谱分析,得出主频值,岩样中的主频值与探头或参考标准件中的主频值的差值与探头主频值的比值表示为主频偏移值,即

$$\Delta f = \frac{|f - f_0|}{f_0} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中: f_0 为声波探头对接时的波形的主频; f 为岩石样品中声波波形的主频。主频偏移值表示在频率域中声波能量的衰减。

1.3 声波衰减实验方法

在实验室中进行声学观测,影响因素容易控制,所分析岩石样品的性质已知,获得的数据准确可靠,因而是岩石声波衰减研究乃至吸收衰减油气预测研究最基础的方法。对于声波衰减实验,岩石样品的尺寸、声学探头的频率、传感器与样品间的耦合等对测量结果有重要影响。这种影响因素可以通过经验与合理的实验步骤来解决,如采用适当的样品尺寸消除多次反射和干涉现象对测量结果的影响,用超声频段测量减少声波几何发散影响等。

对岩石声学性质的实验室测量,包括共振法、准静态法、频谱振幅比法、超声脉冲到时法、应力应变回线法、谐振方法等。这些方法可以分为3类:利用波动传播观测、利用振荡系统观测,以及应力应变曲线观测等。3种方法所用的测量原理不同,所用的测量频率和波形各不相同,测量效果也不完全一致,实验所获得的精度也不一样。

1.3.1 声波速度观测方法

在实验室中有很多方法来测量岩石中的声波速度。常用的方法是利用声波传播定义对速度进行测量。根据速度的定义,声波速度的观测方法基于以下原理:声波在岩石中传播一段距离以后,会经历一段时间,传播距离的长短与所用时间的比值即为岩石中的声波速度。对于岩石中声波速度的测量,关键在于如何准确地确定传播时间 t 。传播时间的确定,受到许多因素的影响,这些因素包括电脉冲的长度与形状、声波初至点的选取(即对首波信号的辨认)、接收系统的性能、传感器的特性等。

假定岩石样品处于接收与发射换能器之间,长度为 x ,换能器对接时的传播时间记为 t_1 ,放置岩石后的传播时间记为 t_2 ,岩石中声波传播时间为 $t=t_2-t_1$,岩石中的声波速度为

$$v = \frac{x}{t_2 - t_1} \quad (1-12)$$

在对岩石中声波传播时间的确定,主要用到脉冲透射法。脉冲透射法利用脉冲声波信号穿透测量的岩石样品,对接收的声波波形进行分析,从波形中确定声波走时,根据样品的长度计算出声波速度。其中关键问题是对首波信号的辨认。

在利用超声波脉冲穿透法进行声学实验时,如果超声波波长与样品尺寸处于同一个数量级,就会出现明显的绕射现象,影响实验的精度和实验的可靠性。因此,在进行声学实验以前,需要利用一些标准件对实验系统和声学探头的性能进行标定,这样能显著地避免样品尺寸对实验结果的影响,提高实验的可靠性。

一般而言,铝性质稳定,能够满足各向同性与完全弹性的假设。而且,当声波在铝试件中传播时,由于铝的品质因子非常大,可以认为声波传播时不产生声波衰减。因此,实验过程中一般用铝试件作为标准试件来对实验系统进行标定,并根据频谱比法,用铝试件幅度的测量与岩石样品中幅度测量值相比较来求出岩石中的声波速度和衰减系数。

声波速度测量实验装置由脉冲发生器、数字存储示波器、发射探头、接收探头、岩石样品、计算机、打印机组成,实验装置如图1-1所示。实验所用的方法是超声波脉冲穿透法。脉冲发生器可产生幅度为1~300V的电脉冲,电脉冲的宽度及重复频率均可调控。由



信号发生器激发一个脉冲电信号，用电脉冲触发超声波发射探头，使之产生有一定幅度的超声波脉冲。通过在岩石中传播以后，由接收探头接收信号，进入数字存储示波器，同时在示波器上实时测量超声波脉冲通过样品的时间及信号幅度，根据已知的待测样品的长度，计算出岩样中的声波速度。

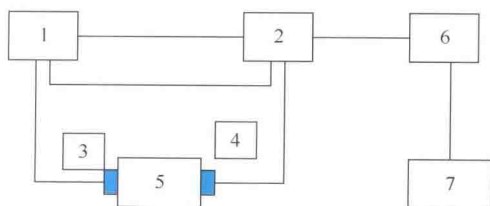


图 1-1 声波速度测量实验装置示意图

1—脉冲发生器；2—数字存储示波器；3—发射探头；
4—接收探头；5—岩石样品；6—计算机；7—打印机

为了对实验中的波形进行分析，在实验系统装置中利用数据采集卡将示波器中的波形进行离散采样，存储在计算机中，将计算机中采集的波形进行恢复与回放，利用快速傅氏变换方法对采集的波形在频率域中进行分析，提取频率域中的参数。在进行声学实验的过程中，首先将探头对接，再将采集的波形作为标准波形与岩石样品中的波形进行对比，进行波形分析。

高温高压声学参数测量时，将试验系统的岩心夹持器部分放入一个高压容器中，通过外加的围压、孔隙压力、温度等参数，在不同的温度、压力下测试岩心样品中的声波速度和幅度。

1.3.2 声波衰减观测方法

在实验室条件下，声波衰减观测也主要应用脉冲透射法。该方法利用脉冲声波信号穿透测量的岩石样品，根据样品中的幅度与参考样品幅度的比值确定岩石样品中的衰减系数，根据衰减系数与品质因子之间的关系计算出岩石中的品质因子。

按照样品尺寸和换能器的位置的不同，可以有多种不同的组合。在各种不同的方法中，当样品长度小于换能器直径时，可以认为来自岩石样品侧面的反射波能量损耗忽略不计；当样品长度与其直径相比为非常大时，产生的波类似于圆柱形杆内的波导。用这种方法对岩石样品进行声学测量时，需要对样品进行仔细加工，使样品两端保持平行，以保证在实验过程中岩石样品与换能器之间有较好的声学耦合。在这几种情况中，几何发散均需加以校正。

对于脉冲透射法来说，利用频谱比法求出样品的衰减系数，因为在衰减介质中，衰减意味着高频首先被介质吸收，因而在岩石样品中会出现声波波形的变化，声波的振幅谱可以写为

$$A(f, x_0) = G_{x_0} A_r(f) \exp[-\alpha(f)x_0] \quad (1-13)$$

式中： G 为包括几何发散、透射系数及反射系数影响在内的一个系数； x_0 为声波传播的距离； $\alpha(f)$ 为衰减系数； $A_r(f)$ 为接收器响应。发射和接收换能器的衰减特征可以利用参考样品的信号来确定，耦合损失可以利用已知的样品与传感器的阻抗来确定。在两种不同距离上的振幅谱之比为

$$\ln \frac{A_1(f, x_1)}{A_2(f, x_2)} = \alpha(f)(x_2 - x_1) + \ln \frac{G_1}{G_2} \quad (1-14)$$

品质因子 Q^{-1} 的展开式中的一阶近似时应有

$$\alpha(f) = \frac{\pi f}{Q(f)v} \quad (1-15)$$

对于给定的声波信号，透射信号的频谱宽度可以认为与频率无关，因此方程可以写为

$$\ln \frac{A_1(f, x_1)}{A_2(f, x_2)} = \frac{\pi}{Qv} (x_2 - x_1)f + \ln \frac{G_1}{G_2} \quad (1-16)$$

利用幅度比值与频率之间的关系曲线，求出曲线的斜率即可以得到岩石样品的品质因子，即

$$g(f) = \ln \frac{A_1(f, x_1)}{A_2(f, x_2)} \quad (1-17)$$

利用以上相同的测量方法，将一个参考样品的声波波形与所研究岩石样品的声波波形加以比较，即是利用频谱比法求岩石样品的衰减系数。在该种方法中要求参考样品中的衰减系数非常小（品质因子非常大），通常用铝试件作参考样品，两种样品应该有相同的长度和几何形状。

在野外实验中也使用频谱比法求声波衰减系数。在该方法中需要靠另一个波至提供尽可能不受干扰的信号。如果地层是高度衰减的岩石，则传播以后记录的岩石样品信号变化很大，从而衰减系数的测量不精确；同时信号振幅在高度衰减后变得非常微弱，背景噪声非常明显。对于微弱衰减的物质，由于回归直线的斜率过低，使频谱比法测量所获得的衰减系数精度较差。

实验室进行观测的主要困难是耦合问题，野外观测中最主要的问题是井中干涉信号产生的干扰。影响频谱比测量精度最主要的因素是换能器尺寸，以及与非平面波阵面有关的几何发散问题所产生的能量衰减，因此对计算出的 Q 值，需要进行各种校正，以保证实验结果的可靠性。

孔隙中流体的存在是导致地震波在岩石中传播衰减的主要原因。本章总结了孔隙中流体地震波衰减的研究现状及机理,分析了经典地震岩石物理模型的特征及适用性,探讨了一种新的理论模型建立思路。

2.1 地震波衰减理论概述

地震波在实际地球介质中传播时,其振幅会由于各种可在宏观上归纳为“内摩擦”过程而衰减,导致质点运动的总能量减少。衰减的过程伴随着速度的频散。岩石孔隙流体的存在是导致地震波衰减的主要原因之一。流体引起地震波衰减的基本假设为:当波动经过岩石时,引起孔隙流体的流动,这种黏滞性的流体流动因摩擦将一部分能量转化为热能而衰减。实际观测数据与岩石物理实验均证实地震频带内的强衰减会伴随有明显的速度频散。随着岩石物理实验与数值模拟技术的进步,学者们尝试利用速度频散特征进行储层特征描述。目前,与衰减有关的地震属性已经应用于地震解释和储层描述。

为了更好地解释地震波在含流体多孔介质中发生速度频散的机理,国内外学者开展了大量的研究。Biot (1956) 提出了黏弹性损耗效应。他根据岩石的弹性系数、流体黏度和渗透率,推导出纵、横波的衰减表达式。早在 1979 年, Taner 等人就分析了与岩石含油气特征有关的“低频阴影”现象,并认为与频率有关的衰减可能是造成这种现象的原因之一。Dutta 和 Ode (1979) 认为超声频率条件下的疏松、渗透性强的岩石中,岩石的吸收衰减主要是由 Biot 型液体流动引起。Grant (1994) 研究了砂岩中速度和衰减的流体效应,在饱和流体的砂岩中,衰减主要受液体的黏弹性影响,局部流动模型不能解释超声波的特征,他利用超声波衰减研究了人工合成孔隙介质和岩石在饱和流体作用下的速度与衰减,用介质微裂隙中的流体黏弹性和孔隙壁的粗糙程度来解释岩石的衰减机制,并认为超声波衰减与 Biot 理论之间的差异取决于砂岩中复杂的孔隙形状。Castagna 等 (2003) 使用谱分解的方法,将“低频阴影”作为烃类指示因子用于烃类检测。Ebrom (2004) 分析了造成“低频阴影”的原因,其中包括地层衰减。Chapman (2006) 利用喷射流衰减机制分析了高低频极限与频散时的地震记录,以及正演模拟的低频阴影。Odebeatu (2006) 用频谱分解技术对地震剖面进行分频,发现了低频衰减现象可以指示油气,并指出 Gassmann 和衰减理论在不同的条件下都会有低频衰减现象。

国内也进行了一些关于岩石物理衰减理论的研究,这些研究集中在宏观和微观尺度。杨顶辉 (2000) 研究了孔隙各向异性的 BISQ 理论,拓展了 BISQ 理论的应用范围,何樵登