



石油高等院校特色教材

声波测井原理与应用

章成广 江万哲 潘和平 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

石油教材出版基金资助项目

石油高等院校特色教材

声波测井原理与应用

章成广 江万哲 潘和平 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了声波测井的基本原理及其应用。全书共分七章。前六章主要包括声波测井的物理基础、声波在裸眼井中的传播、声波速度测井、套管井中声波测井、声波全波列测井、超声成像测井等。最后一章介绍了其他一些声波测井方法,包括噪声测井、声波反射测井方法、随钻声波测井等。

本书可作为石油高校相关专业的教材,也可作为油田相关工作者的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

声波测井原理与应用/章成广,江万哲,潘和平编著.

北京:石油工业出版社,2009.3

石油高等院校特色教材

ISBN 978-7-5021-7004-2

I. 声…

II. ①章… ②江… ③潘…

III. 声波测井—高等学校—教材

IV. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 017387 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.cn

编辑部:(010)64523579 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:中国石油报社印刷厂

2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:12.25

字数:310 千字

定价:19.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

声波测井在油气田勘探及开发阶段中,是获取地质资料的重要手段之一。随着勘探领域的扩展及油田开发的需要,声波理论不断完善,声波测井方法解决问题的能力不断提高,新的声波测井方法和解释方法也在不断产生。声波测井与地震资料相结合,在解决地下地质构造、判断岩性、识别压力异常层位、探测和评价裂缝、判断储集层中流体的性质等方面起着重要作用,这使声波测井成为结合测井和物探的纽带,并有着良好的发展前景。

本书是作者根据勘查技术与工程专业的专业核心课程——“声波测井”教学大纲的要求,在总结十余年来从事研究生、本科生教学经验的基础上,结合油田长期的研究成果编著而成的。本书的内容涉及地质学、物理学、数学、电子学、信息处理等多门学科的知识,通过学习,可以对声波测井的基本方法、原理、资料解释和应用等知识有一个系统全面的了解。由于声波测井技术是一门不断发展和完善的学科,作者希望本书的出版能为声波测井技术的发展尽一份薄力。

由于本书内容涉及的学科方向宽广,需要扎实的数理基础,为便于读者学习,本书在编写过程中注意了以下几点:

(1) 在消化吸收已有教材优点的基础上,对目前各种声波测井新方法进行充分的调研和探讨,博采众长。本教材尽量反映声波测井技术的新理论、新方法、新应用,并同时力求措辞准确,表达正确,引入成熟内容,回避争议观点。

(2) 编写过程中力争做到物理概念阐述深入浅出,数学公式推导思路清晰。强调基础,重视应用。

(3) 编排上力求层次分明,重点突出,图文并茂。

(4) 在教材编写中注意中文名词和英文名词的双向使用。

全书由长江大学章成广负责编著,长江大学江万哲参与编写了绪论、第一章、第三章、第四章,中国地质大学博士生导师潘和平参与编写了第六章。大港油田测井公司柴细元总工程师、塔里木油田肖承文总工程师、中石化西南局测井公司陈必孝、长江大学李维彦为本书提供了现场实际处理资料,并对本书提出了许多宝贵意见和建议,研究生王全、范文同为本书制作了部分插图,在此一并表示感谢。

另外,书中引用了大量中外文献资料,我们对这些文献的作者表示由衷的敬意和衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中的缺点甚至错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2008年10月

目 录

绪论	1
第一节 声波测井的主要方法	1
第二节 声波测井发展历程回顾	2
第三节 声波测井理论问题及发展方向	3
第四节 声波测井的发展展望	5
第一章 声波测井的物理基础	6
第一节 声波与声场	6
第二节 岩石的弹性与弹性系数	8
第三节 岩石的声波速度与影响因素	12
第四节 声波在井中的反射和折射	16
第五节 声波在传播过程中的能量衰减	21
第六节 声波测井换能器	25
思考题	28
第二章 声波在裸眼井中传播	29
第一节 等效弹性地层井中声波传播	29
第二节 孔隙地层的井中声波传播	38
思考题	51
第三章 声波速度测井	52
第一节 井内测量声速信息方法	52
第二节 声波速度信息的地质解释模型	58
第三节 声速测井的影响因素及误差	62
第四节 声速测井的解释与应用	64
思考题	70
第四章 套管井中声波测井	71
第一节 固井和固井质量检测简述	71
第二节 套管井中波成分及影响因素	72
第三节 固井声幅测井主要方法及应用	85
第四节 超声脉冲反射法测井简介	101
思考题	108
第五章 声波全波列测井	109
第一节 裸眼井中声波全波列波形及其特征	109
第二节 声波全波列测井原理	112
第三节 多极子阵列声波测井方法	119
第四节 声波全波列测井资料的应用	126
思考题	152

第六章 超声成像测井..... 153

第一节 超声成像测井概况..... 153

第二节 超声成像测井基本原理..... 154

第三节 换能器特性及成像影响因素分析..... 158

第四节 超声成像测井应用与解释..... 164

思考题..... 171

第七章 其他声波测井方法..... 172

第一节 噪声测井..... 172

第二节 声波反射波测井方法..... 174

第三节 随钻声波测井..... 182

思考题..... 188

参考文献..... 189

绪 论

声波测井方法是测量记录井剖面上岩石的声学性质——岩石的声速、声波幅度在岩石中的衰减规律等，借此判断岩性和估算储集层孔隙度及岩层的弹性力学性质，了解井壁附近岩层的性质和流体的分布，研究钻井地质剖面、判断固井质量等问题的一种测井方法。

声波测井技术从 20 世纪 50 年代初开始出现，到现在经历了几十年的发展，已经成为地球物理测井学科的重要领域，是发展最快和应用最广泛的现代测井方法之一。

第一节 声波测井的主要方法

声波测井是近年来发展较快的一种方法。由最早的声速测井、声幅测井发展到后来的声波全波列测井、偶极子和多极子声波测井、声波成像测井、井间声波测井及随钻声波测井等。

声速测井（Acoustic Velocity Well - Logging）是测量井壁附近岩石声波传播速度的一种测井方法。通过在井中放置发射探头和接收探头，记录声波从发射探头经地层传播到接收探头的时间差值，所以声速测井也叫时差测井。随深度记录的时差值构成时差测井曲线，用时差测井曲线可以确定储集层的孔隙度，判别岩性，特别是易于识别含气的储集层。

声幅测井（Acoustic Amplitude Well-Logging）是测量井下声波信号幅度的一种测井方法，主要用于检查固井后水泥与套管的胶结情况，也称为水泥胶结测井。

声波全波列测井（Acoustic Full Waveform Logging）是指对常规的滑行纵波首波的记录（到达时间及幅度）扩展到对沿井壁传播的滑行纵波、滑行横波及井内流体中的诱导波等整个波列的记录，包括与井壁岩层性质和特征有关的各种组分波的速度、幅度及衰减、频率等信息。

随着声波理论的不完善，声波测井方法解决问题的能力会不断提高，新的声波测井方法也在不断产生。

声波测井与地震资料相结合，在解决地下地质构造、判断岩性、识别压力异常层位、探测和评价裂缝、判断储集层中流体的性质等方面起着重要作用，使声波测井成为结合测井和物探的纽带，并有着良好的发展前景。

表 0 - 1 为常用声波测井的方法的原理及优缺点评述一览表。

表 0 - 1 常用声波测井的方法及评述

声波测井方法		声学特征	用波的种类	主要用途和目的	优点与缺点
声速测井		声波速度	纵波	划分地层，判断气层，估算孔隙度	探测深度受限，只能测量纵波的波速
声幅测井	水泥胶结测井	幅度	套管波	固井（判断第一界面胶结情况）	第二界面的情况无法判断
	声波变密度测井	幅度	套管波、水泥环波、地层波、泥浆波	固井（检查套管井第一、第二界面的胶结程度）	不能反映套管周围不同方位水泥的胶结

续表

声波测井方法		声学特征	用波的种类	主要用途和目的	优点与缺点
噪声测井		幅度	自然声波	找窜槽、井漏，判断流体性质	不易区分油水层
声波全波列测井		速度、幅度、频率	纵波、横波、伪瑞利波、斯通利波	划分岩层，识别岩性、裂隙和孔洞，确定孔隙度，评估岩石力学性质参数	波形提取存在难度
偶极子、多极子阵列声波测井		速度、幅度、频率	纵波、横波、斯通利波	评价井眼稳定性、地层渗透率、裂缝、地层各向异性	测量软地层中横波速度信息及快慢横波分离
声波成像测井	声波井下电视测井	幅度	声波的反射波	准确揭示地层岩性、构造特征及井下套管技术状况	
	超声成像测井	幅度	声波的反射波	辨别软弱层、洞穴、裂缝及孔壁质量，确定井径的变化	
	声波扫描成像测井	幅度	声波的反射波	辨别软弱层、洞穴、裂缝及孔壁质量，确定井径的变化	图像立体直观，受泥浆影响较小，可以达到定性定量解释的目的
	声波层析成像测井	幅度	声波的反射波	研究岩石动力学参数，检测混凝土构件内部的特性分布	
	固井声波成像测井	幅度	声波的反射波	检查套管、固井质量，划分薄层，用于地层评价	
声波随钻测井		声波速度	纵波	提供井位、地层孔隙度、岩石应力、可钻性信息	数据容量大，但只能测纵波、横波的速度
井间声波测井		声波速度	纵波、横波	裂缝识别，确定流体分布、地层走向	增强了横向预测能力

第二节 声波测井发展历程回顾

声波测井于 20 世纪 50 年代初在国外开始出现，先后出现了用于检查水泥胶结质量的声幅测井，测量井剖面声波纵波速度倒数（称为慢度或声波时差）的声波速度测井，能够得到井壁上孔洞、裂缝分布情况直观图像的井下声波电视测井，以及在此基础上发展起来的三维体积扫描测井；20 世纪 70 年代末出现了长源距声波全波列测井；随后为解决软地层中横波勘探问题，提出了偶极子及多极子横波测井，实现了井下直接激发横波；20 世纪 80 年代中期，阵列声波测井仪出现，将常规井眼补偿声系与长源距声系以及井径等测量进行了组合，并对管波（低频斯通利波）的记录给予重视。

声波测井在其 50 多年的发展历程中，有几个代表其发展阶段的事件：

(1) 1956 年由 Wyllie 提出了时间平均公式，使得用声波测井资料估算储集层成为现实，也使声波测井方法进入地球物理测井序列的主航道，这是声波测井发展初期的重要事件。

(2) 20 世纪 70 年代末出现长源距声波全波列测井, 实现了对滑行纵波、滑行横波、伪瑞利波在时间轴上的分离。随后, 阵列声波测井实现了对声波全波列的数字化记录, 从而在相当长的一段时间内, 支持了对井筒内声场的理论研究。这是声波测井发展的重要时期。

(3) 20 世纪 90 年代初出现了偶极子及多极子横波测井, 使对井壁声场的研究从传统的滑行波等转换波模式发展为直接激发模式, 从轴对称的圆柱场发展为非对称的圆柱场。

(4) 以获得井壁直观图像为目的的井下声波电视以及后来的体积扫描、井周声波成像方法的完善, 使在方法原理上较为简单的声脉冲反射法依托计算机技术实现了对井壁附近空间介质分布的声学成像。

从声波测井的发展特点来看, 仪器研制略超前于方法理论的完善, 即在大致的理论方向指导下研制成功仪器, 并在井下取得较丰富的测井资料的前提下, 使方法理论趋于完善。

第三节 声波测井理论问题及发展方向

随着油田勘探开发的需要和计算机水平的发展, 声波测井理论的研究从刚问世时的声波速度模型发展到现在的二维、三维井眼模型及多极子源的情形。在此过程中, 数理模型逐渐由简单到复杂, 解决的问题由单一趋于多元化, 数学方法与数值计算也更趋于完善。

20 世纪 70 年代末以来, 声波测井的发展有以下一些重要方向。

一、井筒内声场的理论模算

圆柱状井筒中声场的理论计算即正演问题是声波测井的最基本问题之一。在这方面, 国外最重要的成果是 White (1968) 首次模拟计算了井外为均匀无限介质、井内为液体时, 井内能接收到的转换波(滑行纵波、滑行横波、瑞利波)及管波波导(斯通利波)的全波波列图形。Rosenbaum (1974) 依托 Biot 理论, 用实轴积分法计算了井壁为孔隙介质、井内为液体时的声波全波波列图形。国内吉林大学和江汉石油学院(现长江大学)进行了跟踪, 并形成了较稳定的研究方向, 但这方面的研究更接近理论物理和计算物理学科的课题。

二、声波全波列的信号处理及解释评价问题

此问题是声测井反演问题的第一步。声波全波列的信号处理是依据正演问题的结果, 在对井下接收到的声波波列中的各种类型的转换波进行正确识别的基础上, 估算出井壁地层的纵、横波速度以及各种波的幅度及衰减系数等。赵培华等(1992)的工作是对声波全波列各种转换波识别及提高信噪比方法的较系统的总结。

三、岩石声学或孔隙介质声学及声波测井资料地质解释的研究

1952 年提出的 Biot 理论, 给出了一种将岩石这样的孔隙介质(非均匀介质)当作均匀介质处理并描述其中波动过程的近似方法。特别是 Biot 理论预计的孔隙介质存在慢纵波得到实验证实后, 用 Biot 理论对声波测井理论进行地质解释又成为关注的重点之一。其中最诱人的前景是可根据横波、管波的幅度或能量估算储集层的渗透率。

声波测井解释方法研究的另一个受到重视的方向是对估算孔隙度模型的改进。先后提出的对时间平均公式的改进是: 声波时差与孔隙度间的关系是非线性的; 声波地层因素概念认

为,在岩石类孔隙介质中声波主要是通过岩石骨架传播的,准确给定岩石骨架的声波速度或时差值是准确估算孔隙度的关键。

四、声脉冲反射成像测井及水泥胶结测井方法研究

用较高频率的声波脉冲向井壁发射并记录由井壁或井壁外各声学界面的反射回波,可准确地识别井壁及井壁外各声学界面的位置及声学特性(主要是声阻抗)。20世纪60年代国外就出现了井下声波电视,80年代出现了记录固井后套管附近声反射脉冲的水泥胶结评价测井(CET),90年代出现了兼有井下电视和水泥胶结评价的井周声波成像测井(USI)。国内从70年代末起步的声波电视测井,到目前已和国外水平相当接近:在井下使用两种频率的声学,分别对记录到的声波反射脉冲的走时及幅度进行彩色成像。国内自行研制的水泥胶结评价测井仪器UCT、CBET的设计要求都有评价第二界面胶结状况的功能。

五、偶极子及多极子横波测井

由于软地层不能通过纵波入射转换为滑行横波,国外在20世纪90年代提出在井下激发非对称声场,并在井壁上产生速度接近于横波的弯曲波或扭曲波的方法。这种方法使对井内声场的研究发展到更高的阶段,并为软地层的横波勘探奠定了良好的基础。但20世纪90年代早期,这种方法成功的案例还不多,在声速很低的地层中,效果不一定好。

六、声源及声频谱的研究

近年的研究表明,声源的不同谱函数将影响到对其所产生的波列的模拟。而声波信号的频率将主要影响声波测井在井壁地层中的探测深度。中国石油大学(北京)声波测井研究组提出在井下设置频率不同的声学探头组合,以实现距井壁表面不同径向深度处地层声学性质差异的探测。

七、井间声波探测研究

随着井间地震勘探技术的发展,井间声波探测问题日益提到日程上。与井间地震不同的是,井间声波探测不破坏井壁,所记录的信号可控而且可重复。多井间的测量结果可进行层析成像(CT)。这对追踪储集层在注水、注气开发后的动态监测有重要作用,而且这种方法的可靠程度要超过现有的任何一种测井方法。除了上述这些方向外,近年来的研究内容还有电一声效应或声—电效应等方法。这些方法使传统的地球物理概念中各种物理场独立的假设重新受到检验。

八、套管井中声波测井

在套管井方面,理论探索的重点在于下套管后或地层受泥浆侵入后井内各种模式波信号的变化和影响因素的确定。对多极子声源在套管井中激发的模式波也有相当的研究。

Baker(1984)为了考察声波测井的探测深度,计算了径向多层固体介质中的声场,并得出了有泥饼和侵入带存在时的全波波型。他认为声波测井的探测深度很浅,它取决于发射探头与接收探头间的距离(源距)。短源距声波测井的结果主要反映侵入带的影响,对于胶结好的套管井,声波测井能记录到地层的纵波、横波速度。Tubman(1984)做了和Baker类似的工作。他侧重于套管井中的声传播问题。他得出的结论是井眼中的套管对全波波型有

很大影响,其中一个明显的变化是管波频率成分的降低,这是由于井眼内含流体层厚度减少造成的;地层波受套管影响不大,若水泥速度和地层速度相差不大或高于地层速度,则不易观测到地层波;套管的折射波幅度很小,难于观测到;斯通利波和伪瑞利波受套管影响明显,同时它们也受水泥和地层的影响;套管的厚度和水泥的声速、厚度及衰减对全波列也有很大的影响,但套管的速度和衰减对全波列影响不大。Schmitt (1988)对偶极子、四极子声源在套管井中激发的模式波研究表明,不论对软地层还是硬地层,弯曲模式和基本模式的低频部分携带井外介质的横波信息,而其高频部分显示斯通利波的性质。在套管井中,低频多极子声源能测量到低速地层中的横波速度。

第四节 声波测井的发展展望

由于声波测井理论的成熟,伴随着科技的进步,声波测井技术现在被广泛地应用于水电、铁道、冶金、工业和民用建筑领域,成功地解决了资源和工程勘察中的有关问题。特别是在21世纪,资源已成为制约我国快速发展的重要因素,而石油、天然气居于各种资源的首位,声波测井是油气藏勘探、开发的重要手段。随着国家一些大型基建项目的开工和国家对于灾害地质的防护的需要,声波测井技术在今后的发展中将发挥越来越重要的作用。声波测井为了满足这些需要,必将有所创新。

(1) 实验研究。物理学是实验的科学,并且声波测井属于应用领域,任何一点进步都离不开实验。近年来,实际生产、工程需要刺激了声波测井的发展,理论研究相当活跃,实验研究内容必将非常丰富。

(2) 软硬件发展势头迅猛。硬件指仪器在数据采集方面,扩大动态范围、提高数据的传输速度;对于软件,则集中体现在数据信号处理、非线性反演以及软件的集成化等。

(3) 数据采集信息的实时共享和网络化。在互联网技术飞速发展和日益扩展下,人们可以对同一信号进行几乎无限制的共享。宽带技术突破了信号的速度和总量的限制,从而为信号的共享创造了条件。

(4) 声波测井技术与其他地理物理方法融合更紧密。一种方法或技术只有和其他方法技术相结合,才能发展得更快,应用领域也才能更为广阔。目前,声波测井技术同地震勘探技术的结合便产生了很好的效果。随着科技发展和勘探领域的扩展,声波测井技术同其他地球物理方法和科学技术方法必将融合得更加紧密。

第一章 声波测井的物理基础

声波或弹性波是指弹性介质中传播的压强、应力、质点位移、质点速度等的变化或几种变化的综合。声波是物质的一种运动形式，它由物质的机械振动产生，通过质点间的相互作用将振动由近及远地传播，而质点与质点之间有弹性并且相互联系，所以声波在物质中的传播与物质的弹性密切相关。本章将介绍与声波测井有关的某些基本概念、岩石声学的基础知识，并用几何声学讨论井中声波传播特性。

第一节 声波与声场

一、声波的基本概念与声波参数

(一) 基本概念

1. 声

声即声音，通常指人耳能够感觉到的空气振动。广义地说，声音是各种弹性介质中的机械波，包括人耳不能感知的振动。

2. 声波

由于声源引起的由近及远向周围传播的机械振动就是声波，或者说声波就是各种弹性介质中的机械波，也就是说声波是在介质中传播的机械振动。声波涉及的是质点的位移、速度、密度和压强等力学参数，因此声波是机械波。

3. 弹性波

弹性波也称为机械振动波，是指在弹性介质中传播的波。弹性介质中物质粒子间有弹性相互作用，当某处物质粒子离开平衡位置，即发生应变时，该粒子在弹性力的作用下发生振动，同时又引起周围粒子的应变和振动，这样形成的振动在弹性介质中的传播过程称为“弹性波”。在液体和气体内部只能由压缩和膨胀而引起应力，所以液体和气体只能传递纵波。而固体内部能产生切应力，所以固体既能传播横波也能传播纵波。

声音不能在真空中传播，只能通过具有弹性的介质传播。声波传播的介质可以是各种气体、液体和固体。一般在流体介质中传播的波为声波，在固体介质中传播的波为弹性波。

声波测井发射的声波能量较小，作用在岩石上的时间也较短，所以对声波测井来讲，岩石可看作弹性体。因此研究声波在岩石中的传播规律，可以应用弹性波在物质中的传播规律。

(二) 声波参数

1. 频率

声波传播的时候，介质振动的频率即介质质点每秒钟振动的次数就是声波的频率，一般用 f 表示。它是声波的基本参数，单位是赫兹，简称赫，记作 Hz。

2. 周期

周期是指介质完成一次振动所需要的时间, 一般用 T 表示, 单位是秒, 记作 s。周期等于频率的倒数, 即 $T=1/f$ 。

3. 速度

速度指声波的传播速度, 即波动或弹性波动能量的传播速度, 一般用 c (或 v) 表示。声波的传播速度一般由介质的性质决定。

4. 波长

声波在介质中传播时, 相位相同的两点在空间上的距离称为声波的波长, 记作 λ 。波长 λ 与频率 f 和速度 c 的关系是: $\lambda=c \cdot T=c/f$ 。

通常人的耳朵只能听到频率在 $20 \sim 20000\text{Hz}$ 之间的声音, 这种频段的聲音称为可听声; 频率低于 20Hz 的声音就称为次声, 次声发生时所产生的波动称为次声波; 频率高于 20kHz 的声波称为超声波。声波测井中用的频率一般在 $2000 \sim 20000\text{Hz}$ 之间, 而超声成像测井频率在 $0.2 \sim 1.5\text{MHz}$ 之间。

二、声场的基本概念与描述声场的基本物理量

声场是指介质中有声波传播的区域。描述声场的基本物理量一般有声波速度、声压、声功率、声强等。

在声波传播过程中的某一瞬时, 由于声波传播在介质中造成的压力称为声压 (其实是压强), 用 p 来表示, 单位为微帕 (μPa)。声波在某一单位时间内, 沿其传播方向通过波阵面所传递的能量称为声功率, 用 W 表示, 单位为微瓦 (μW)。在声波传播的波阵面上, 单位面积上声功率的大小称为声强, 声强通常用 J 表示, 单位为瓦/米² (W/m^2)。

为了说明声压 p 和声强 J 的数学关系, 先讨论由于声压引起的介质质点振动速度。设在和声波传播方向垂直的方向上有一密度为 ρ 的介质薄层, 其厚度为 dr , 面积为 S , 如图1-1所示。

在薄层左侧面上, 存在作用力 $F_1 = pS$; 在其右侧面上, 由于声波在介质中传播了 dr 以后, 声压变化为 $p + dp$ (dp 为负值), 因而对此体积元右侧面的作用力为 $F_2 = (p + dp)S$ 。所以该薄层沿其传播方向运动的合作用力为:

$$F = F_1 - F_2 = pS - (p + dp)S = -Sdp \quad (1-1)$$

根据牛顿第二定律, 此力等于薄层的质量和其加速度的乘积, 所以有:

$$-Sdp = \rho Sdr \cdot \frac{dv}{dt} \quad (1-2)$$

式中 v 为质点振动速度。两边化简并对时间积分, 有:

$$v = -\frac{1}{\rho} \int \frac{dp}{dr} dt + v_0 \quad (1-3)$$

式中 v_0 为积分常数。当没有声压作用时 ($t=0$), 薄层的运动速度为零, 即 $v_0=0$, 故有:

$$v = -\frac{1}{\rho} \int \frac{dp}{dr} dt \quad (1-4)$$

在一般情况下, 声压为一正弦变化量。按波动方程的解, 距声源为某点的声压可以写成:

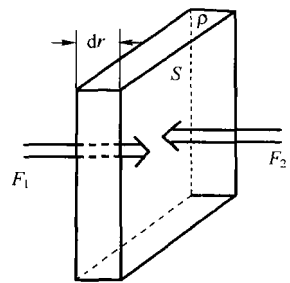


图 1-1 弹性体在平面波作用下的位移

$$p = p_0 e^{i\omega(t-r/c)} \quad (1-5)$$

式中 ω ——声波振动的角频率；

p_0 ——声压幅度；

c ——介质中的声速（不同于质点的振动速度 v ）；

$t-r/c$ ——在距声源 r 处，振动过程要比声源滞后 r/c 。

式（1-5）的物理意义是：在理想介质中（声波在其中传播不损失能量），在时刻 t 距离声源 r 处的某点的声压与声源处（ $t-r/c$ ）时刻的声压值相同。

对式（1-5）求导得：

$$\frac{dp}{dr} = -p_0 i\omega \cdot \frac{1}{c} e^{i\omega(t-r/c)} \quad (1-6)$$

将式（1-6）代入式（1-3）中可得：

$$v = \frac{1}{\rho c} p \quad \text{或者} \quad \frac{p}{v} = \rho c \quad (1-7)$$

式（1-7）的物理意义可以作电学类比， p 相当于“电压”，质点振动速度 v 相当于“电流强度”， ρc 相当于“电阻抗”，因此 ρc 称之为波阻抗或声阻抗，通常以 Z 表示。

得到介质质点振动速度表达式后，考虑作用力 $F_1 (= pS)$ 在薄层移动距离 dx 时所做的功 $F_1 dx$ ，单位时间内所做的功即为声功率，而单位面积上的声功率即为声强，所以：

$$J = \frac{W}{S} = \frac{F}{S} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{pS}{S} \cdot v = pv \quad (1-8)$$

而 $v = \frac{1}{\rho c} p$ ，所以：

$$J = pv = p \cdot \frac{p}{\rho c} = \frac{p^2}{\rho c} = \frac{p^2}{Z} \quad (1-9)$$

从式（1-9）可以看出：声强和声压的平方成正比，与波阻抗成反比。

声场中，单位体积内的声能量称为声能量密度，用 ϵ 表示。假定声速为 c ，而单位体积内的声场能量为 ϵ ，按声强 J 的定义，在单位时间内通过波阵面的单位面积上的能量即为声强度，即 $J = \epsilon c$ ，因此：

$$\epsilon = \frac{J}{c} = \frac{p^2/\rho c}{c} = \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (1-10)$$

第二节 岩石的弹性与弹性系数

声波测井中，声波的传播介质是岩石，而影响声波在岩石中传播的主要因素是岩石的岩性及其他物理化学性质。本节将重点介绍岩石的弹性及弹性常数。

一、岩石的弹性

（一）弹性体的基本概念

受外力作用发生形变，外力取消后，恢复到原来状态的物体称为弹性体。而当外力取消后不能恢复其原始状态的物体称为塑性体。一个物体是弹性体还是塑性体，不仅和物体本身的性质有关，而且和物体所处的环境有关（温度、压力等）及外力的特点（外力作用的形

式、时间和大小)有关。在一般情况下,外力小,作用时间短,物体表现为弹性体。

对某一样品做力学实验,若增加拉力 F ,则形变程度、样品内聚力会相应增加;若 F 逐渐减小至零,该样品也逐渐恢复至原来形状。这样形变称为弹性形变,组成该样品的物质称为弹性介质。

(二) 理想弹性体的基本特征

在弹性力学中,对研究的物体通常有以下几个基本假设:

(1) 物体是连续的,即整个物体都被组成该物体的介质所充满,因而该物体的一些物理量如应力、应变、位移以及描述物体或介质的弹性力学性质的参数都可以当作空间上的连续参数来处理。

(2) 物体是均匀的。所谓均匀,是指物体由同一类型的均匀材料所组成。如果在物体中任选两个体积大小相等、形状完全相同的体积元,其全部物理、化学性质均应相同,而且能代表整个物体的物理、化学性质。

(3) 物体是各向同性的,也就是说,物体的性质与方向无关。因此,物体的弹性常数不随坐标方向的改变而改变。

(4) 物体是完全弹性的,即对应于一定的温度,存在着应力和应变之间的一一对应关系,且应力—应变关系是线性的,服从广义虎克(Hooke)定律。在弹性限度范围内,杨氏模量 E 、切变模量 G 、泊松比 σ 和体积弹性模量 K 等表征物体弹性力学性质的参数都是恒定的常量,不随时间而改变,和物体的历史无关。在形变过程中没有能量损耗,即弹性波在传播过程中不发生衰减。

满足以上几个基本假设条件的物体称为理想弹性体。

理想弹性体在外界因素作用下所产生的形变或位移远小于理想弹性体原来的尺寸,均在弹性限度范围之内;外力撤出之后,理想弹性体能完全恢复原状。

从 17 世纪 70 年代末虎克揭示弹性体的形变和所受外力之间的规律(即虎克定律)至今,对于理想弹性体的研究已经相当成熟,弹性力学研究的不断深入和内容的不断扩展,也促进了它在工程领域(如地球物理学)中的应用。

(三) 岩石与理想弹性体的差异

地球物理学研究的对象是地壳中各种不同地质年代、由不同成分矿物组成、结构各异的岩石。显然,地下岩石并非理想弹性体。

首先,岩石中有孔隙和裂缝,并不是连续介质。这些孔隙和裂缝中往往含有油、气、水等不同于骨架成分的物质。而且,孔隙和裂缝的大小、形状和分布都是随机的,所以岩石也非均匀介质。同时,由于存在沉积的层理、断裂形成的节理等因素,岩石的各向异性情况相当复杂。因此,对于地下岩石来说,描述其弹性力学性质的杨氏模量 E 、切变模量 G 、泊松比 σ 和体积弹性模量 K 等参数以及应力、应变、位移等都和理想弹性体有区别。例如,当地下岩石受力变形时,不仅需要考虑岩石固相骨架的位移,还要考虑岩石孔隙和裂缝中与骨架相态不同的流体 τ (油、气、水)的位移,因为两者是不同的,固相与液相交界面处的位移是不连续的。

其次,由于岩石有孔隙和裂缝,而其中的流体在受力时发生形变的规律不可能与固相骨架相同,甚至存在着流体在孔隙中的流动和骨架颗粒的相对滑动,因而使整个岩石表现出非弹性的特征。

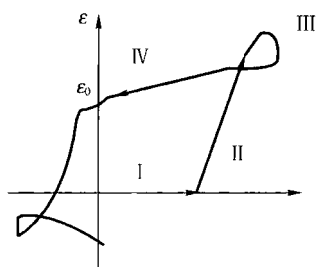


图 1-2 非完全弹性体的应力与应变的关系示意图

图 1-2 为非完全弹性体在受单轴方向应力时，应力与应变的关系示意图。

图中的 I 段表示由于要克服介质内部的内摩擦和粘滞，在应力较小的范围内没有测量到应变。图中的 II 段表示应力在中等范围内时，应力和应变之间为线性关系。图中的 III 段表示应力较大时，由于发生塑性形变或由于孔隙、裂缝的扩大或延伸，或由于固相骨架部分的稳态破损，应力和应变之间不再保持线性关系，即应变增大更为明显。当应力逐渐减小时，由于介质已发生不可恢复的塑性形变，此时应力和应变不再保持单

值关系，如图上的 IV 段。同时，还可以看到，当应力减小到零值时仍保留有剩余的应变 ϵ_0 ，这表现非完全弹性体和完全弹性体的又一差别——塑性，即外力完全消失后物体并不恢复到原始状态，而保持剩余形变（即所谓塑性形变）。

另外，对于非完全弹性体，由于有内摩擦和粘滞还会产生弛豫现象，即应力和应变的相位并不相同。也就是说，应变到达最大值的相位（或时间）与应力达到最大值的相位（或时间）并不相同，而是相差一个相位移（时间）因子。

岩石类地质体还有一个重要的特点是，岩石的等效杨氏模量 E 、切变模量 G 、泊松比 σ 和体变模量 K 等参数都是随时间而改变的。因此，将岩石看成弹性介质是一种近似。

对于声波测井，由于发射的声波能量较小，作用在岩石上的时间也较短，所以在声波测井中，岩石可看作弹性体。因此研究声波在岩石中的传播规律，可以应用弹性波在物质中的传播规律。

二、岩石的弹性系数

（一）应力与应变

在介绍弹性常数前，先来介绍一下应力和应变。

应力：单位横截面所产生的内聚力 F/S 称为应力。它是在弹性体内部发生形变的体积元和相邻的体积元之间相互作用的量度，是弹性体反抗使其发生形变的外力而产生的内力。

应变：单位长度所产生的形变 $\Delta l/l$ 称为应变。应变包括角应变、体应变、线应变三种。

（二）弹性系数

在弹性力学中，用弹性系数来确定弹性介质的弹性性质。常用的几个弹性常数为：杨氏模量 E 、剪切模量 G 、体积弹性模量 K 、泊松比 σ 、密度 ρ 、拉梅系数 λ 和 μ 。以下将分别给出有关参数的定义。

1. 杨氏模量

杨氏模量又可以称为拉伸模量和纵向伸长系数，一般用 E 表示。在线性弹性形变区，应力与应变的比值称为杨氏模量。因此，杨氏模量在数值上等于弹性体发生单位线应变（ $\Delta l/l$ ）时弹性体产生的应力大小，即：

$$E = \frac{F/S}{\Delta l/l} \quad (1-11)$$

对大多数固体，当外力不超过弹性极限时，应力与应变成正比，即服从虎克定律。

2. 剪切模量

剪切模量又可以称为切变模量和刚性模量，一般用 G 表示。剪切模量是指弹性体在发生单位角应变 (θ) 时所需的剪切应力的大小，即：

$$G = \frac{F/S}{\Delta l/l} \left(\approx \frac{F/S}{\theta} \right) \tag{1-12}$$

流体介质中不发生剪切形变，因此在流体介质中 $G=0$ 。

3. 体积弹性模量

体积弹性模量又称体积压缩模量，一般用 K 表示，指弹性体受均匀静压力 p 时，静压力与体应变 ($\Delta V/V$) 的比值：

$$K = \frac{p}{\Delta V/V} \tag{1-13}$$

4. 泊松比

泊松比一般用 σ 表示，表征弹性材料变形时横向缩短 ($\Delta d/d$) 和纵向伸长 ($\Delta l/l$) 的比值，即：

$$\sigma = - \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} \tag{1-14}$$

表 1-1 中举出一些岩石和介质的与弹性性质有关的参数。

表 1-1 一些岩石和介质的与弹性性质有关的参数

参数 介质	杨氏模量 E	体积模量 K	切变模量 G	拉梅系数 λ	泊松比 σ	密度 ρ g/cm ³
	10 ⁴ MPa					
钢	20	17	8	11	0.30	7.70
铝	7	7.5	2.6	5.5	0.35	2.70
玻璃	7	5	3	3	0.25	约 2.55
花岗岩	7	3	2	2.5	0.25	约 2.67
石灰岩	5.5	3.5	2	3.5	0.20~0.32	约 2.65
砂岩	4.5	3	1.5	2.5	0.23~0.28	约 2.45
页岩	3	2	1	1	0.22~0.40	约 2.35

泊松比 σ 的取值范围为 0~0.5，流体 $\sigma=0.5$ ，软沉积物 $\sigma \approx 0.45$ ，岩石 $\sigma \approx 0.25$ ，刚性岩石 $\sigma \approx 0.05$ 。对自然界中常见的岩石来说， $\sigma=0.25$ 。

5. 密度

岩石的密度定义为单位体积岩石的质量，一般用 ρ 表示。由于岩石由固相骨架和孔隙流体组成，分别定义骨架的密度 ρ_{ma} 和孔隙流体的密度 ρ_f 。若孔隙中只存在一种密度为 ρ_f 的流体，岩石的密度 ρ 可表示为：

$$\rho = (1 - \phi)\rho_{ma} + \phi\rho_f \tag{1-15}$$

式中 ϕ ——岩石的孔隙度。

6. 拉梅系数

表征应力和应变方向一致和互相垂直的两个系数称为拉梅系数，一般用 λ 和 μ 表示。 λ 和 μ 是为了在使用上的方便引入的，并不具有明显的物理意义。数值上有：

$$\lambda = K - \frac{2}{3}G \tag{1-16}$$