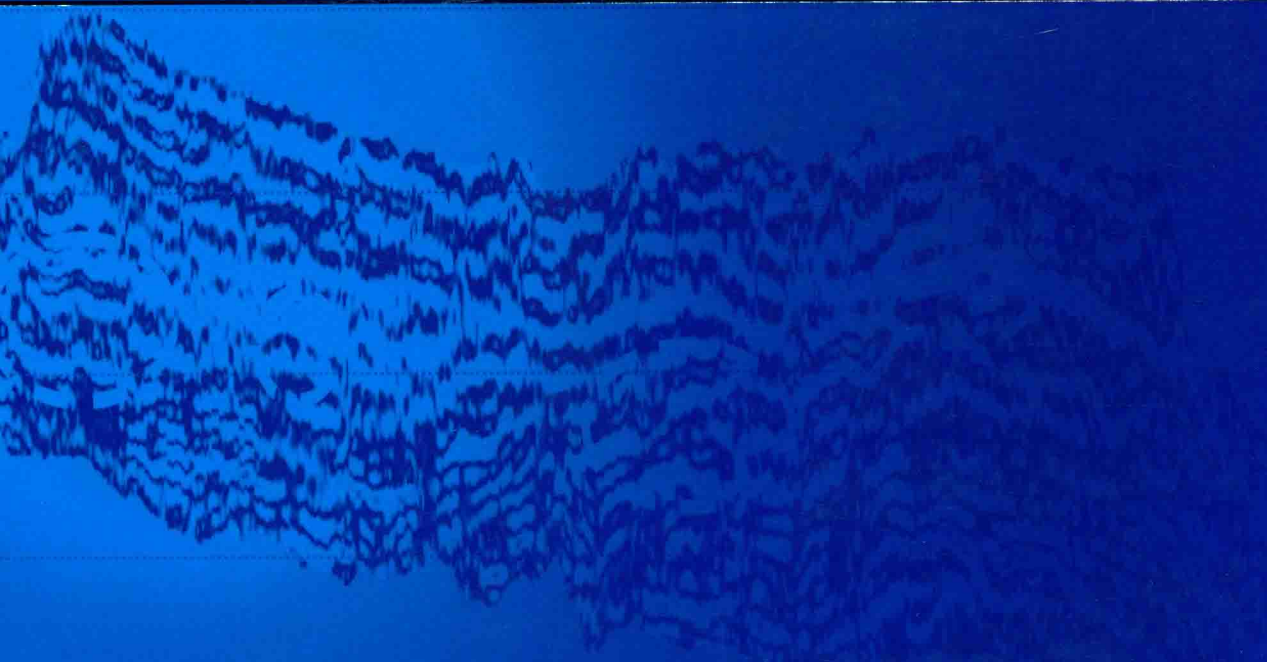


中国石油大学（华东）“211工程”建设重点资助系列学术专著



叠前地震反演

© 印兴耀 张繁昌 孙成禹 著

Prestack Seismic Inversion



中国石油大学出版社

中国石油大学（华东）“211工程”建设重点资助系列学术专著

叠前地震反演

印兴耀 张繁昌 孙成禹 著



中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

叠前地震反演/印兴耀,张繁昌,孙成禹著. —东营:中国石油大学出版社,2010.9
ISBN 978-7-5636-3225-1

I. ①叠… II. ①印…②张…③孙… III. ①地震勘探—重力反演问题 IV. ①P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 167685 号

书 名: 叠前地震反演
作 者: 印兴耀 张繁昌 孙成禹

责任编辑: 李 锋(电话 0532—86981532)
封面设计: 赵志勇

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营, 邮编 257061)
地 址: 山东省东营市北二路 271 号
网 址: <http://www.uppbook.com.cn>
电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com
排 版 者: 青岛海讯科技有限公司
印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司
发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546—8392791 0532—86981532)
开 本: 180×235 印张:20 字数:422 千字
版 次: 2010 年 9 月第 1 版第 1 次印刷
定 价: 49.00 元

总序

“211工程”是新中国成立以来，由国家立项展开的规模最大、层次最高的高等教育建设工程，是国家为振兴高等教育、建设人力资源强国而做出的重大教育发展决策。“211工程”抓住学科建设、师资队伍建设等决定高校水平提升的核心内容，通过重点突破带动高校整体发展，探索了一条高水平大学建设的成功思路。经过十多年的努力，“211工程”取得了显著成效，在学科建设、人才培养、科技创新等方面取得了丰富成果，使中国的高等教育产生了重大变化，大幅度拉近了我国高等教育与世界高等教育的距离，对于相关高校整体水平的提升产生了巨大的推动作用。

1997年，中国石油大学跻身“211工程”重点建设高校行列，形成了学校更好地开展高水平大学建设的重大历史机遇。经过“九五”、“十五”两期建设，进入“十一五”第三期建设，三期建设有机衔接，从重点学科建设到学科群建设，再到创新队伍建设和创新人才培养，学校“211工程”建设始终围绕提升学校水平这个核心，不断拓展建设思路和建设内容，其“以优势带整体，以特色促水平”的建设思想与学校发展整体思路实现了高度吻合。所以，十多年来，“211工程”建设的轨迹就是标识学校发展的一条主要线索。

“211工程”建设所取得的成效带来了学校办学水平的全面提升。依托“211工程”，经过十多年的建设和发展，学校主干学科优势和特色更加突出，带动了相关学科水平的提高，学科结构更加优化，学校进一步获得了国家对“优势学科创新平台”项目建设的支持；师资队伍建设成效显著，高层次人才明显增加，特别是培育发展起一些高水平团队；科技创新能力大幅提升，突出了在基础理论研究、应用研究等方面的优势，已初步建立起有学校特色的科技创新体系，在十多个研究领域居国内领先水平，有些达到国际先进水平，科技成果转化取得巨大社会效益和经济效益；人才培养质量明显提高，逐步建立起以素质教育为主导的科学的教育教学体系，有效保证了创新人才的培养；国际学术交流与合作不断深入，学校开放办学和国际化程度得到大大推进；办学条件大幅改善，建成了先进的公共服务系统，形成了良好的软硬条件支撑。总体

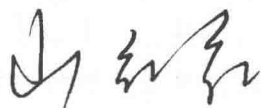
上,在“211工程”建设的推动下,办学水平大幅提升,学校办学特色更加鲜明,开创了学校建设高水平大学的良好局面。

“211工程”建设所取得的经验是学校办学的宝贵财富。首先,重点突破的策略保证了学校可以抓住影响办学水平的学科建设、创新能力等重点工作和任务,集中资源、队伍和时间进行重点建设及发展,有效提升了学校的核心竞争力;其次,滚动发展的思路保证了学校找准优势并不断强化优势,以点带面不断完善整体结构,促进了学校的协调发展和可持续发展;另外,以项目为平台进行系统组织的机制保证了学校加强统筹规划、资源集成、队伍整合,加强了对各个环节、各种因素的系统优化,建立了一系列行之有效的工作制度。

“211工程”建设也锻炼形成了一支甘于奉献、勇于创新队伍,促进了全校在这样一个综合平台上的协同配合。在十多年的建设过程中,许多同志全身心投入有关工作,坚持不懈地追求更高水平和更高目标,有关部门协调一致,切实保证了各项建设任务的顺利实施。所以“211工程”也是学校的一项事业工程、合力凝聚工程。

学校现在已经展开“211工程”三期建设,同时正在进入建设“国内著名、石油学科国际一流的高水平研究型大学”的奋斗征程,“211工程”建设将继续成为学校实现新的发展目标的重要支撑。总结前期“211工程”建设的成功经验,充分展示“211工程”建设的丰富成果,对于更好地推动“211工程”建设,实现学校的奋斗目标,具有重要的现实意义。为此,学校决定设立专项资金,资助出版“211工程”建设有关的系列学术专著,分门别类地介绍和展示学科建设、学术发展、科技创新和人才培养等方面的成果和经验。虽然“211工程”建设作为一项综合性的重大工程,对其进行系统全面的总结存在一定难度,但相信这套丛书完全可以从不同的侧面、从一些具体的内容,展示我校“211工程”建设的巨大成绩和发展思路,对今后“211工程”建设和学校总体发展起到应有的启示和促进作用。

中国石油大学(华东)校长



二〇〇八年十月

前 言

叠前地震反演包括 AVO 反演、弹性波阻抗反演、叠前波形反演、声波或弹性波方程反演等反演方法。AVO 反演是最早的叠前反演方法,它是在 AVO 理论出现以后,利用 AVO 属性进行的反演。弹性波阻抗反演是世纪之交出现的一种叠前反演方法,目前已成为波阻抗反演进一步发展的方向之一,是一种比较稳健、切实可行的叠前反演方法。叠前波形反演和波动方程反演是目前国内外正在研究的热点,引领着叠前地震反演技术的未来。

作者对叠前反演已经有十多年的研究,本书是我们在“十五”和“十一五”期间研究成果的总结。全书共八章。其中,第一章,第二章一、二节,第三章,第四章一、二节,第七章二、四、五节由印兴耀教授编写;第二章三、四、五节,第五章由孙成禹教授编写;第四章三、四、五节,第六章,第七章一、三节,第八章由张繁昌副教授编写。全书由印兴耀教授统稿。书中既有系统的理论,又有翔实的实际数据应用,对从事油气地球物理、地震综合解释的工程技术人员、科研人员具有很好的参考价值,希望能够起到抛砖引玉的作用。

本书得到了中国石油大学(华东)地球资源与信息学院、中石化集团公司及胜利油田分公司、中国海洋石油总公司、中石油地球物理重点实验室等单位领导和专家的大力支持和帮助,本课题组研究生也做了大量相关的工作,在此表示衷心的感谢!

由于我们的专业水平和实际经验有限,书中难免存在不妥之处,希望广大读者和专家提出宝贵意见。

作 者

2010 年 5 月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第二章 岩石物理基础	(4)
第一节 弹性参数	(4)
第二节 波速与孔隙度和岩性的关系	(7)
第三节 孔隙介质理论	(9)
第四节 流体替换	(17)
第五节 基于岩石物理理论的地震正反演方法	(19)
第三章 Zoeppritz 方程及其近似	(34)
第一节 Zoeppritz 方程的导出	(34)
第二节 Zoeppritz 方程的特点	(39)
第三节 Zoeppritz 方程各近似式的定性分析	(41)
第四节 Zoeppritz 方程各近似式的定量分析	(56)
第四章 地震反演数学基础	(66)
第一节 反演问题的正则化方法	(66)
第二节 非线性反演问题的求解	(71)
第三节 反问题求解的神经网络法	(83)
第四节 模拟退火法	(88)
第五节 遗传算法	(91)
第五章 AVO 反演技术	(101)
第一节 AVO 技术概述	(101)
第二节 AVO 理论基础	(104)
第三节 AVO 正演方法	(107)
第四节 AVO 处理技术	(122)
第五节 AVO 反演方法	(133)
第六节 AVO 解释技术	(144)
第七节 广角 AVO 分析	(150)

第八节	τ - p 域 AVO 方法	(155)
第九节	影响 AVO 的因素及研究前缘	(163)
第六章	叠前地震波动方程反演	(170)
第一节	概 述	(170)
第二节	Born 反演	(171)
第三节	叠前地震记录的弹性波方程模拟	(173)
第四节	叠前数据的遗传算法反演	(211)
第七章	叠前弹性波阻抗反演	(223)
第一节	叠后波阻抗反演的基本原理	(223)
第二节	弹性波阻抗反演的基本原理	(239)
第三节	角道集资料	(246)
第四节	弹性波阻抗反演及岩性参数的提取	(255)
第五节	岩石物性参数直接反演	(264)
第八章	叠前反演应用实例	(269)
第一节	在气藏描述中的应用	(269)
第二节	在 KD 地区岩石物理参数与地球物理特征研究中的应用	(290)
参考文献		(305)

第一章 绪 论

随着地震技术的不断进步,地震研究的领域已从勘探拓展到开发阶段,由构造解释深入到储层和流体预测,而地震反演在其中起着关键的作用。纵观地震反演技术的整个发展过程,我们不难看出,由于其独特的核心地位和重要作用,地震反演吸引了无数的地球物理学家在这一领域开展了大量的卓有成效的研究工作,使得这一技术得到不断的丰富和发展,经历了和正在经历着从间接反演到直接反演、从声波反演到弹性波反演、从叠后反演到叠前反演、从线性反演到非线性反演以及从利用传统的数学方法到利用现代数理方法的发展过程。

地震勘探的首要任务就是要得到地下可靠的构造图像和地层物性的估计。目前,各种偏移技术已应用到叠前及叠后数据上,解释人员可利用这些偏移图像从地震剖面上确定出主要的地层层序。但是偏移技术只能提供几何图像,而通常解释人员希望得到的是反射界面的物性参数,这些物性参数是根据地震数据确定岩性所必需的。从构造油气藏到岩性油气藏的今天,从地震数据中确定这些物性参数就更加重要,因为利用地震岩性可以进一步解释可能的油气聚集带。

随着三维偏移技术的引入,地震成像在近十年来发展非常迅速。偏移是一种物理成像方法,多数情况下我们同时希望得到储层物性参数,这些物性参数对利用地震数据识别岩性是非常有用的。偏移将地震同相轴归位到合适的时间和空间位置,波形反演可利用同相轴的振幅及旅行时信息提取物性参数,偏移和波形反演具有很好的互补性,二者的结合将为地震反射数据的定量解释提供一套完整的方法。

地球物理反演是利用地球表面观测到的物理现象,推测地球内部介质的空间变化及物性结构。地震反演是地球物理反演的一个分支,其目的是根据地震资料反推地下介质波阻抗、速度和密度等岩石地球物理参数的分布,估算储层参数,并进行储层预测,以便为油气田的勘探和开发提供可靠的基础资料。

反演可以在叠后做,也可以在叠前完成。叠后地震反演方便快捷,其声阻抗反演成果在一定程度上能够反映储层的内部变化规律。近年来,国内外发表和推出了一些有关叠后反演的新方法、新技术和软件系统,它们有其自己的方法、技术特点和实现特点,注重了地质、测井资料与地震资料的结合使用,但在复杂储层和含油气性反演方面还有不少待探讨的实际问题。由于使用全角度多次叠加后的叠后地震资料缺乏叠前数据所包含的丰富的振幅和旅行时信息,在某种程度上削弱了反映储层特征的敏感性。另外,叠后地震反演只能提供种类很少的纵波波阻抗等参数,不能给出纵横波速度比、泊松比等反映物性、流

体特征参数,在研究储层物性、流体方面受到了限制。

叠前地震反演与叠后地震反演相比,具有良好的保真性和多信息性。叠前地震资料反演技术,包括先进的弹性波场反演方法在内,克服了叠后反演的不足,不但适合薄储集层物性反演,还可进行含油气性反演。叠前地震反演保留了地震反射波振幅随偏移距不同或入射角不同而变化的特征,并充分应用了叠前不同入射角的地震道集数据,部分角叠加和梯度、截距等数据体。通过对这些数据的纵、横波反演技术研究,能够得到纵、横波波阻抗,纵、横波速度,纵、横波速度比,密度,泊松比等多种参数体;提供了研究岩性、储层、流体变化规律的更多、更有效的反演数据体成果。叠前地震反演较叠后地震反演推进一步,能够更可靠地揭示地下储层的展布情况、储层的物性及含油气性。

地震反演通常特指声阻抗(acoustic impedance, AI)反演。AI反演是指利用地震资料反演地层波阻抗的地震特殊处理解释技术,它具有明确的地球物理意义,是储层预测、油藏特征描述的确定性方法,在实际应用中取得了显著的地质效果。该项技术在20世纪70年代开始出现,80年代得到蓬勃发展。90年代至今达到巅峰,围绕一维波阻抗反演的各类算法以及应用成果层出不穷,热门之余在1997年左右开始出现了一些反思文章,指出了波阻抗反演中存在的一些陷阱,也提出了一些解决方案。BP Amoco公司的Connolly在1999年正式发表了弹性波阻抗(elastic impedance, EI)反演的方法研究,掀起了弹性波阻抗研究的热潮。该方法最早是在1993—1994年由BP Amoco公司发展起来的,随后在2000年的SEG年会上同时出现了一些文章对EI进行了研究,CGG公司发表文章认为EI反演效果要好于AVO反演,因为EI在抗噪能力方面比AVO方法具有优势;同时BP Amoco公司在会上又提出了扩充弹性波阻抗方法,可以用于流体和岩性预测。这些进展说明:弹性波阻抗已经成为波阻抗反演进一步发展的方向之一,地震反演的发展正在走向AI和EI相结合、AI和AVO相结合的道路。

就是在叠前反演中采用不同方法的效果也是不一样的。为了从P波反射中估算地层的弹性属性,最近出现了两种独立的方法。一种是所谓的AVO反演,是从地震数据中抽取AVO属性,然后在合适的测井曲线的约束下将其转化。另一种是弹性波阻抗反演,首先是在模拟的测井曲线约束下转化一定角度范围的角道集,再反演所需的弹性参数。

Cambois比较了AVO反演与EI的区别,他认为这两种方法只在子波不随偏移距变化时是相同的,当子波由于噪音等因素发生变化时,会在不同的AVO属性之间产生“泄漏”,在通常使用的入射角范围内,这种“泄漏”压制了一些抗噪属性。这使得AVO反演不能提供满意的解决办法。然而,弹性波阻抗能够避免这个问题,因此弹性波阻抗具有优越性。

本书第一章简要介绍了叠前反演的作用和技术发展现状。考虑到岩石物理理论是连接地震数据和储层参数的桥梁,本书第二章介绍了弹性参数的概念、地球物理参数与储层物性参数之间的内在联系、孔隙介质理论和流体替换方法,以及在此基础上的地震正演模拟结果分析。第三章系统介绍了Zoeppritz方程及其各种简化形式,以及他们之间的相互

关系,这是 AVO(amplitude variation with offset)理论的核心。第四章是地震反演的数学基础,介绍了常用的线性和非线性反演方法、确定性反演方法和随机反演方法等。第五章介绍了 AVO 分析和处理方法、AVO 属性参数的提取、流体因子及其物理意义、AVO 资料的解释及影响因素等。第六章和第七章分别介绍了叠前波动方程反演方法和弹性波阻抗反演方法,包括叠前反演方法原理、偏移距道集到角度道集的转化、叠前反演流程、岩石弹性参数的提取等。第八章是叠前反演的应用实例。这样从叠前反演的理论基础到反演方法和应用实例,使读者能够对叠前反演形成系统的认识。

第二章 岩石物理基础

随着地震勘探技术的发展,地震数据解释工作的目标不仅仅是寻找可能的含油气构造,通常还用来分析岩性、孔隙度、孔隙流体等储层特性。这就要求我们对反映岩石物理特性的地震波特征与地下储层参数之间的关系有深入的了解。影响岩石物理性质的因素主要有三个方面:① 岩石的组成,包括组成岩石的矿物成分、岩石内部的孔隙度、岩石的饱和状态和孔隙流体的性质等;② 岩石内部的结构,包括矿物颗粒的大小、形状及胶结情况,岩石内部的裂隙和其他不连续界面等;③ 岩石所处的热力学环境,包括温度、压力和地应力场等。岩石物理性质决定了地震波的纵波速度、横波速度、密度和弹性模量等地球物理参数,它们是我们识别岩性、孔隙度、孔隙流体的重要参数。通过岩石物理学的研究,能够了解地球内部岩石的物理性质和岩石的地球物理特征之间的关系,为利用地震资料预测分析地下岩石、流体的性质提供理论基础以及必要的资料,减小不确定性和多解性,成为连接地震数据和储层参数的桥梁。叠前地震资料 AVA, AVO 处理及叠前地震反演是提取地震纵波速度、横波速度、密度及弹性模量等地球物理参数的有效技术手段。

第一节 弹性参数

首先,简要地定义一些在描述各向同性介质时普遍使用的弹性参数,了解这些弹性参数对于我们准确理解岩石物性有很大的帮助,同时也是我们研究储层和识别油气的重要参数。普遍使用的弹性参数主要有弹性模量、密度、纵横波速度、泊松比等。弹性模量是岩石在外力作用下发生的伸缩、剪切和体积变化的特征参数,是联系应力-应变关系的常量。剪切模量 μ 是作用在岩石上的剪切应力与剪切应变之比;体积模量 K 是在外力作用下岩石体积发生的变化,反映岩石的可压缩性;杨氏模量 E 则反映在外力作用下岩石发生的伸缩变化,这些模量如图 2-1 所示。为了方便,定义 $M = \lambda + 2\mu$ 为平面波模量。

在均匀各向同性介质中,密度 ρ 反映单位体积岩石的质量,纵波速度 v_p 和横波速度 v_s 可用密度 ρ 、体积模量 K 和拉梅常数 λ 、 μ 来表示:

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (2-1)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2-2)$$

泊松比是反应岩性和含气性的重要参数,它是用岩石纵向拉伸和横向压缩的比值来表示的,如图 2-2 所示。泊松比与纵横波速度比有如下关系:

$$\sigma = \frac{0.5 - (v_s/v_p)^2}{1 - (v_s/v_p)^2} = \frac{0.5 - \gamma^2}{1 - \gamma^2} \quad (2-3)$$

$$\frac{v_p}{v_s} = \left(\frac{1 - \sigma}{0.5 - \sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-4)$$

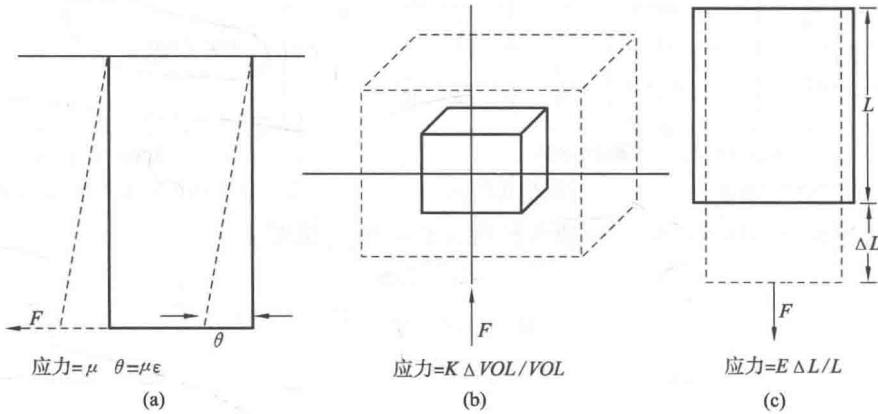


图 2-1 弹性模量及其物理意义

(a) 剪切模量 μ ; (b) 体积模量 K ; (c) 杨氏模量 E

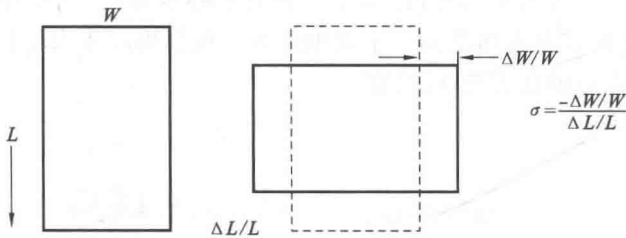


图 2-2 泊松比的物理意义

图 2-3 给出了含气和含水砂岩的 v_p/v_s 与泊松比的关系。由图中可见,当 $v_p/v_s = \sqrt{2}$ 时,则 $\sigma = 0$;当 $v_p/v_s = 1.5$ 时,则 $\sigma = 0.1$ (含气砂岩情形);当 $v_p/v_s = 2.0$ 时,则 $\sigma = 0.333$ (含水砂岩情形);当 $v_p/v_s = \infty$ 时,则 $\sigma = 0.5$ ($v_s = 0$, 液体情形)。图 2-4 说明只依靠纵波速度不易区分岩性,但如果将泊松比与纵波速度进行交汇,则容易区分岩性。通常含气砂岩的 σ 在 0.08~0.17 之间,含油水砂岩的 σ 在 0.18~0.33 之间,含油气水灰岩、白云岩的 σ 在 0.25~0.36 之间,它们的纵波速度在 4~6.5 km/s 之间;而硬石膏的 σ 在 0.28~0.36 之间,但其纵波速度在 6~7.3 km/s 之间;泥岩的 $\sigma > 0.32$,煤的 σ 在 0.38~0.46 之间。

通过测量岩石纵向拉伸和横向压缩的比值计算的泊松比通常称为静态泊松比,而通过测量岩石的纵波速度和横波速度,由式(2-3)计算的泊松比通常称为动态泊松比。

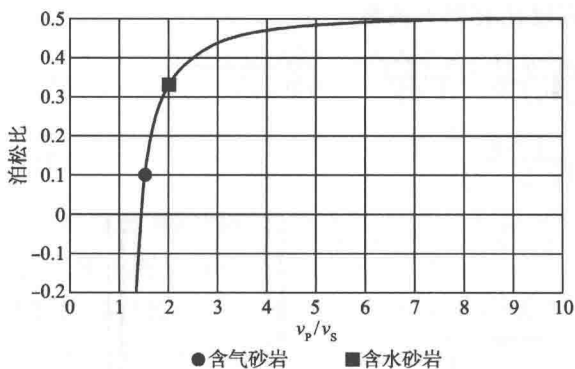


图 2-3 含气和含水砂岩的 v_p/v_s 与泊松比的关系

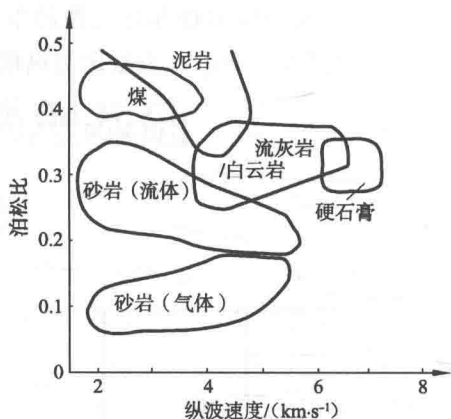


图 2-4 纵波速度与泊松比交汇图

在论述虎克(Hooke)定律时使用拉梅常数 λ 和 μ , 满足:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= \lambda\theta + 2\mu e_{xx} \\ \sigma_{yy} &= \lambda\theta + 2\mu e_{yy} \\ \sigma_{zz} &= \lambda\theta + 2\mu e_{zz} \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xy} &= \mu e_{xy} \\ \tau_{yz} &= \mu e_{yz} \\ \tau_{zx} &= \mu e_{zx} \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

如果单元体表面受力大小相等,且作用力相对中心点对称,其作用方向相反,该作用力等于一个常数,此时该单元体受到一个周围压力。根据周围压力的符号不同,单元体将发生膨胀或压缩。设周围压力为 p , 则有:

$$\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} = 3p$$

于是有:

$$3p = 3\lambda\theta + 2\mu(e_{xx} + e_{yy} + e_{zz}) = (3\lambda + 2\mu)\theta$$

所以有:

$$\theta = p/K \quad (2-7)$$

该式表示单元体在胀缩应变状态下,相对体变与周围压力成正比。式中 K 称为周围压缩模量,可表示为:

$$K = \frac{3\lambda + 2\mu}{3} \quad (2-8)$$

上述弹性参数间的关系见表 2-1。

表 2-1 各向同性的弹性参数

	λ, μ	M, μ	K, μ	E, σ
平面波模量 M	$\lambda + 2\mu$	M	$\frac{3K + 4\mu}{3}$	$\frac{(1-\sigma)E}{1-\sigma-2\sigma^2}$

续表

	λ, μ	M, μ	K, μ	E, σ
剪切模量 μ	μ	μ	μ	$\frac{E}{2(1+\sigma)}$
体积模量 K	$\frac{3\lambda+2\mu}{3}$	$\frac{3M-4\mu}{3}$	K	$\frac{E}{2(1-2\sigma)}$
杨氏模量 E	$\frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}$	$\frac{\mu(3M-4\mu)}{M-\mu}$	$\frac{9\mu K}{\mu+3K}$	E
泊松比 σ	$\frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$	$\frac{M-2\mu}{2(M-\mu)}$	$\frac{3K-2\mu}{2(\mu+3K)}$	σ
拉梅常数 λ	λ	$M-2\mu$	$\frac{3K-2\mu}{3}$	$\frac{\sigma E}{1-\sigma-2\sigma^2}$

第二节 波速与孔隙度和岩性的关系

孔隙度定义为岩石总体积中被孔隙空间占据的份额：

$$\phi = \frac{V_{\text{孔隙}}}{V_{\text{岩石}}} = \frac{V_p}{V_b} \times 100\% \quad (2-9)$$

根据储层岩石中孔隙是否连通,孔隙度分为绝对孔隙度和有效孔隙度。在沉积岩中不连通孔隙的体积一般不超过孔隙总体积的百分之几,可是当孔隙度较低时($\phi < 10\%$),此值可能增大。

岩石埋深增大时,孔隙度一般变小。此外,孔隙度的变化不仅沿垂线方向,而且沿岩层层理方向都很大。处于原生理藏状态的沉积岩,孔隙中始终充填着液体,如矿化水,有时还有石油或天然气。

在其他因素相同时,孔隙度大的岩石波速小。这是因为岩石孔隙度的变化会有效地改变岩石密度,而且与孔隙度随应力变化而变化的变化率相关。这种变化率依赖于孔隙的形状。研究指出,孔隙总体积对速度的影响是主要的,而孔隙大小和形态及矿物颗粒大小和形状对速度的影响要小得多。在相同应力条件下,圆形孔隙的形变比狭长形孔隙的形变小得多。当孔隙度相同时,骨架颗粒细、孔隙小的岩石比颗粒粗、孔隙大的岩石的速度高约百分之几。考虑到这一点,在理论研究时,作为第一级近似,可以假定固结岩石的固体物质成分和性质是均匀分布的,其骨架则为宏观均匀的各向同性介质。

随着孔隙度的不同,同一种岩石的速度值可以在很大范围内变化。另一方面,固相成分不同的岩石也可能具有相同的波速。

Wyllie(1956)提出了一个描述波速与孔隙度关系的实验公式,即“时间平均方程”：

$$\frac{1}{v} = \frac{\phi}{v_f} + \frac{1-\phi}{v_m} \quad (2-10)$$

式中, v 为流体饱和岩石中的波速; v_f 为孔隙中所含流体的波速; v_m 为岩石骨架的波速; ϕ 为孔隙度。

当 v_m 和 v_f 固定时,方程中的唯一变量是孔隙度 ϕ 。此方程最适合的是中等孔隙度的砂岩($10\% < \phi < 25\%$)。时间平均方程在声波测井中曾经被广泛应用于计算岩层的孔隙度,但是人们很快发现此公式的不足之处,特别是这个公式过高地估计了波在含粘土砂岩中的速度。

Raymer(1980)提出了一个非线性经验公式用于描述孔隙度和波速的关系,即:

$$v = (1 - \phi^2)v_m + \phi v_f \quad (2-11)$$

该公式可适用于更大的孔隙度范围,包括高孔隙度的非固结沉积物。但是这个公式也忽略了其他参数的作用。

Domenico(1984)把时间平均方程修改为纯经验公式,用于描述速度和岩石孔隙度的关系,即:

$$\frac{1}{v} = A + B\phi \quad (2-12)$$

其中, A, B 可以由回归分析得到。这个公式也过分简化了速度与岩石物性的关系,特别是忽略了粘土含量对砂岩横波速度的作用。

Han(1986)等人对此作过综合研究。通过对 80 块不同泥质含量和孔隙度的砂岩样品,在不同的压力下测试它们的纵波速度和横波速度,研究了纵横波速度比 v_p/v_s 、泥质含量、含水饱和度、弹性模量等与速度的关系。研究表明,纵横波速度 v_p 和 v_s 随着孔隙度增大和泥质含量的增加而减小。任何拟合泥质砂岩的纵横波速度 v_p 和 v_s 的公式必须包含泥质含量这一项。下面公式给出了围压为 40 MPa,孔隙压力为 1.0 MPa 的简单关系式:

$$v_p = 5.59 - 6.93\phi - 2.18N \quad (2-13)$$

$$v_s = 3.52 - 4.91\phi - 1.89N$$

泥质砂岩的速度与所含的泥质成分和泥质在砂岩中的位置的关系不大。上述公式在压力相差 10 MPa 以上时,其拟合系数也相当稳定。因此,速度除与孔隙度关系最密切以外,素泥质含量是对其影响最大的因素。

对于非纯砂岩,实验室测量和测井统计表明:孔隙度 ϕ 、泥质含量 N 与纵横波速度存在近似的线性关系:

$$v_p = A_p + B_p\phi + C_pN \quad (2-14)$$

$$v_s = A_s + B_s\phi + C_sN \quad (2-15)$$

系数 $A_p, B_p, C_p, A_s, B_s, C_s$ 由实验室测量和测井确定,许多作者的统计结果见表 2-2。

表 2-2 孔隙度和泥质含量与纵横波速度的关系

	A_p	B_p	C_p	A_s	B_s	C_s
Tosayo	5.8	-8.6	-2.4	-3.7	-6.3	-2.1
韩德华等	5.59	-6.93	-2.18	3.52	4.91	-1.89
Castagna 等	8.81	-9.42	-2.21	3.89	-7.07	2.04
甘利灯	5.37	6.33	-1.82	3.15	-3.51	-1.52

Klimento 用纵波速度 v_p 来反映孔隙度 ϕ 、渗透率 K 和泥质含量 N 。获得了孔隙度为 6%~36% 时的经验关系:

$$v_p = 5.27 - 5.4\phi - 2.54K - 0.001N \quad (2-16)$$

第三节 孔隙介质理论

众所周知,影响地震反射特征的主要因素是介质的速度和密度。第一节给出了均匀介质纵横波速度及其他参数的基本关系式。当我们把注意力转向多孔流体饱和的岩石时,情况变得相当复杂。自从 1928 年起已经出现了近 20 种理论。最早的要数 1928—1929 年的 Voigt-Reuss 模型,而最早最实用的要数 1951 年的 Gassmann 方程。到 1956 年出现了最著名的 Boit 双相介质理论。理想的孔隙岩石体由四部分组成(图 2-5):岩石基质、孔隙流体系统、干岩石框架(骨架)和饱和岩石本身。该形式下的多孔介质的特征推动了弹性理论的扩展——多孔弹性理论诞生了。

多孔弹性理论描述了在正常压力和温度下介质的性态,同时考虑了孔隙中充填的流体的作用。在岩石四部分组成中,人们用抽空岩石骨架和湿润岩石两项替换了上面所说的干岩石骨架和饱和岩石两项。当孔隙中含有流体时,介质变为双相介质。研究双相介质理论就是研究组成骨架及流体的各个成分的性质对岩石整体物性的作用和贡献。因为各种理论纷繁复杂,总的说来,大致有三种理论:有效介质理论、接触理论和自适应理论。

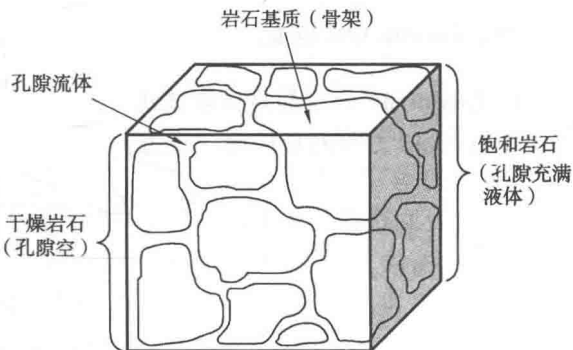


图 2-5 孔隙介质岩石模型

因为各种理论纷繁复杂,总的说来,大致有三种理论:有效介质理论、接触理论和自适应理论。

岩石本质上是非均质的,其性质随测量尺度而变化,当研究尺度与介质中的“夹杂”尺度相比大得多时才可以按均匀介质处理。为了描述多孔流体饱和的岩石性质,常用有效介质理论,即假设有这样一种单相的介质,其性质与多相介质的宏观平均相同,这种假设的单相介质就称为该多相介质的“有效介质”。因此有效介质理论认为岩石总体的物性参数是由各成分各自的物性参数综合而成的,称为有效物性参数。如 Wood 方程认为岩石总体的压缩系数 β 及体积模量 K 与各成分的压缩系数及体积模量之间的关系为:

$$\beta = \sum_{i=1}^n \varphi_i \beta_i \quad (2-17)$$

$$\frac{1}{K} = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i}{K_i} \quad (2-18)$$

式中, φ_i 为各成分的体积百分比。岩石骨架颗粒相互接触时,所得结果为其下界。