

深层油气地震勘探数据采集与处理方法

谭绍泉 著

P618.13

谭绍泉 著

深层油气地震勘探

数据采集与处理方法

SHENCENG YOUQI DIZHEN KANTAN
SHUJU CAIJI YU CHULI FANGFA

地质出版社

深层油气地震勘探 数据采集与处理方法

谭绍泉 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

向深层寻找更多的油气资源,是未来地震勘探的一个重要方向。本书结合在中国东部胜利探区进行的深层地震勘探实践,分析了深层地震勘探中地震波传播特点,针对提高深层弱反射信号的信噪比和分辨率,研究了深层地震勘探中干扰波的形成机制和压制方法、深层地震勘探激发方式和新型激发震源、面元叠加采集方法以及针对深层地震信号成像的特殊处理方法等内容。

本书较系统地总结了在东部地区进行地震资料采集和处理所采用的技术方法,是一本较好的研究深层地震勘探的技术资料,有较强的针对性。本书可供从事地震勘探技术人员及大专院校相关专业师生阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

深层油气地震勘探数据采集与处理方法/谭绍泉著.

—北京:地质出版社,2004.5

ISBN 7-116-04070-6

I. 深… II. 谭… III. 油气勘探:地震勘探
IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 041979 号

SHENCENG YOUQI DIZHEN KANTAN SHUJU CAIJI YU CHULI FANGFA

责任编辑:蔡卫东

责任校对:郭惠兰

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部);(010) 82324571 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zhs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787 mm × 1092 mm ¹/₁₆

印 张:9.75

字 数:250 千字

印 数:1—700 册

版 次:2004 年 5 月北京第一版·第一次印刷

定 价:30.00 元

ISBN 7-116-04070-6/P·2471



(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 深层地震勘探的难度和可行性.....	(1)
第二节 国内外开展深层地震勘探的现状.....	(3)
第三节 开展深层勘探的目的和意义.....	(4)
第二章 地震波传播中吸收和衰减规律	(6)
第一节 地震波传播中吸收和衰减规律分析.....	(6)
第二节 地震波的吸收与衰减规律数值模拟结果分析.....	(9)
第三节 地震波传播中吸收和衰减模型建立及分析.....	(12)
第三章 干扰波的形成机制和压制方法	(21)
第一节 深层干扰波特征.....	(21)
第二节 深层干扰波产生机制.....	(23)
第三节 深层干扰波压制方法及效果.....	(24)
第四章 激发方式理论初探与实际资料分析	(27)
第一节 激发爆炸机理初探.....	(27)
第二节 炸药震源爆炸机制及激发条件对下传能量的影响.....	(28)
第三节 不同激发方式实际资料分析.....	(37)
第五章 新型激发震源的研究和应用	(46)
第一节 多级延迟爆炸震源的原理.....	(46)
第二节 多级延迟爆炸震源的理论分析.....	(47)
第三节 多级延迟爆炸震源应用效果.....	(52)
第六章 观测系统方式对深层反射能量的影响	(57)
第一节 设计观测系统的主要原则.....	(57)
第二节 深层勘探接收条件的选取.....	(58)
第三节 地震数值模拟.....	(61)
第四节 深层地震采集方案论证方法.....	(69)
第七章 面元叠加地震采集技术的研究和应用	(72)
第一节 面元叠加技术原理及实现方法.....	(72)
第二节 采集实例及应用效果.....	(78)
第三节 结论.....	(83)
第八章 深层资料处理方法研究	(85)
第一节 深层地震信号特征分析.....	(85)
第二节 深层信号增强与噪音衰减.....	(89)
第三节 多次波衰减.....	(103)
第四节 高精度速度分析及动静校正方法.....	(108)

第五节 增强深层反射信号的途径及效果·····	(115)
第六节 高精度偏移成像技术·····	(124)
第七节 实际资料处理效果分析·····	(130)
第九章 结论与建议 ·····	(145)
第一节 结论·····	(145)
第二节 建议·····	(148)
致谢·····	(149)
参考文献·····	(150)

第一章 概 述

目前,我国的绝大多数油气田,特别是东部油气田,浅、中层的油气藏或者已被探明,或者正在开发。有不少油气区已经接近高含水期。在这种情况下,寄希望于在常规勘探深度出现大规模的、可接替油气藏已不太现实。基于这种原因,把油气勘探目标瞄准含油气盆地的深层,已迫在眉睫^[1]。深层油气勘探不仅仅在理论上,而且也在实践工作中越来越受到重视,逐渐被许多油田提上了议事日程,势必成为今后石油勘探和开发的新热点。作为深层油气勘探的先行军——地震勘探技术,首先,必须在采集方法上有新的突破,能够获得真正反映深层地质现象的反射信号,是深层地震勘探技术的关键。其次,是解决深层弱反射信号的成像问题。作者的研究从地震采集和处理方法研究入手,从理论到实践,较系统地分析了地震波能量传播和弱反射信号的叠加问题,取得了明显的应用效果。

第一节 深层地震勘探的难度和可行性

一般认为,就中国的中部、东部而言,深度大约在 3500 ~ 4000 m 以下地层,或以老地层为主的新一轮油气勘探目标,即可认为是深层^[2,3]。深层地震勘探中的目的层虽然比中、浅层有所加深,但在实际工作中所采取的流程依然是由人工激发地震波,经由仪器接收,形成原始地震记录,然后对原始资料进行一系列的加工、处理、解释,得到最终的地质成果。虽然这是一整套相当成熟的方法技术,但由于勘探层位的加深而出现的许多特殊问题,仍然使人们不得不对比中、浅层勘探更多而且是更大的困难。

一、采集技术方面的难点

由于勘探目的层位的加深,通常不得不采用较大的爆炸药量,以保证目的层信号有足够的能量可以被记录下来,与此同时大药量也会产生较大的低频效应,使高频成分能量较小,影响分辨率的提高;另一方面,由于地下介质对地震信号有明显的选频衰减效应,地震信号中的高频成分比低频成分损失更大,也影响了分辨率。这些现象在深层勘探将会变得尤为严重,如何补偿地震信息中损失的高频成分、拓展优势频带,是能否开展好深层勘探的一个关键环节。

随着勘探深度加大,通常不得不采用长排列,以确保能够完全接收地下深层弱反射信号,但就目前而言,所用的地震仪器并不是为深层勘探特制的,因而势必存在仪器道数偏少、动态范围不大等缺憾。在现有条件下,解决这些问题的权宜之计只能是加大药量、加大偏移距、加大道间距等方法,显然,这些方法都是与提高分辨率所应该坚持的原则相违背的。

二、处理技术方面的难点

由于深层地震勘探野外采集获取的资料存在着信噪比较低、信号频带窄、反射信号

弱、地下地质现象复杂等问题,随之而来的必给资料处理带来新的难点。如何解决好深层能量衰减问题,深层速度精度问题,以及特殊的动、静校正问题、各种干扰波压制和去噪问题、叠加与偏移成像问题等等^[4],都给深层资料的处理带来了不同于浅、中层资料处理的特殊难度。

叠前深度偏移技术正被逐渐应用于资料处理中,这种方法的优势是众所周知的。但是,其最终结果的成像精确程度仍要依赖于高精度速度分析结果和速度场的建立。对于深层地震勘探而言,深层高精度速度的拾取,是非常困难的,其应用效果肯定要比浅、中层资料处理的结果差。

总而言之,深层地震资料的处理,与浅、中层资料处理相比,矛盾会更为突出,难度要更大。

三、解释技术方面的难点

在我国大部分油气田中,深部勘探确实是一个新层系、新领域。以往所做的勘探工作量甚少,资料也很少或参差不齐。特别是钻遇深层的探井甚少,借助于探井资料来了解地下地质形态、结构等诸方面的信息远不如浅、中层丰富^[5]。势必影响了对含油气盆地深层区域地质规律、沉积盆地的演化、构造运动的影响、油气成藏成因条件等的认识。由此可见,利用地震资料开展深层勘探工作显得尤为重要。可以预料,随着深层地震勘探技术的深入研究,经广大科技人员的努力一定会取得较为满意的地质效果,开创深层油气勘探新局面,为“稳定东部、发展西部”战略目标做出新贡献。

四、开展深层地震勘探的可行性

开展深层地震勘探需要突破许多难点。但是,随着油气勘探逐步向新区、新层系、新领域发展,地震勘探必须走在油气田勘探的前列,开展深层地震勘探技术研究已成为我国物探界首当其冲的任务。

(1) 从地质特征上分析:我国渤海湾盆地内七大生油坳陷,有明显的复式成藏特点。深层油气勘探目标主要是指 3500 m 以下的层位,在这个范围内存在的油气藏一般产生于凹陷的深部或低潜山,其地质层位有老第三系孔店组,沙三段及沙四段,还有前第三系的中生界、古生界及太古宇。地层中具有丰富的油气资源,这是深层油气勘探的基础^[6~8]。在渤海湾含油气盆地先后发现了任丘潜山油气藏、千米桥潜山油气藏、桩西-埕岛潜山油气藏、义和庄-大王潜山油藏、五号桩-孤东-垦东潜山油藏等等,以及在勘探深度大于 3500 m 的中生界、新生界沙四-孔店组,都相继发现新的油气田。近两年来,在胜利探区车西凹陷又发现了富台潜山油藏和东营凹陷南坡古潜山构造^[9]。所有这一切,都证实了渤海湾盆地深层有巨大的勘探潜力。从区域地质特征、油气分布规律等方面,证实了开展深层地震勘探技术研究的必要性及可行性。

(2) 从地球物理特征上分析:从渤海湾盆地乃至我国东部探区,区域地质特征到沉积特征,也证实具有良好的深层地震地质条件和地球物理特征。从沙三段以上地层,具有六大套区域性标准反射波组。从沙三段至中生界上部具有三大套标准反射波组。从中生界至盆地结晶基底,还有四大套标准反射波组,特别是上古生界奥陶系到古生界寒武系还具

备有多套较稳定、有明显地球物理特征的反射波组。这对从浅、中、深层全面追踪不同构造层的区域地质特征是十分有利的^[10~12]。但是,也必须看到,渤海湾盆地的中生界地层是以潟湖-沼泽相沉积为主,并伴有火山活动和多期构造运动交替,地层沉积和构造特征复杂,造成波阻抗界面表现不突出,地层吸收与衰减严重,反射特征不明显。这对研究古生界构造特征是不利的。总体上讲,渤海湾盆地由于多幕构造运动和多次沉积间断的出现,尽管深层构造破碎而复杂,但地球物理特征是明显的,有利于开展深层地震勘探技术研究。

(3) 从地震设备上分析:目前,新一代的有线和无线遥测地震仪成为许多地震队的标准装备。这些仪器记录精度高,畸变小,噪声低,动态范围大,软、硬件功能大大增强,地震道数已由几百道发展到上千道,甚至数千道,而且灵活、机动性强。这对开展深层地震勘探技术研究是非常有利的,也能够胜任目前深层勘探的要求。

(4) 从采集方法上分析:近十多年来,随着地震仪器和数据处理技术的发展,采集新技术、新方法日新月异,给地震勘探技术水平增添了新的活力^[13]。高精度三维地震、复杂地表高精度采集方法、采集参数的优化设计、先进的表层调查技术、面元叠加采集技术、基于模型技术的观测系统设计认证、新型的激发震源和接收系统研制等等新技术、新方法,为开展深层地震勘探技术研究提供了最大的技术支持。

(5) 从资料处理上分析:在地震资料的计算机处理技术方面,新一轮的大规模集成化多节点并行处理机已更新换代,配备的高新处理软件、可视化显示软件等,特别是多维多域三维叠前叠后去噪、DMO 处理技术、高精度面元叠加技术、叠前时间域或深度域偏移技术、高精度速度拾取技术、CRS 叠加技术等等新模块的涌现^[14~16],为地震资料的处理提供了最强有力的保障,也为深层资料的精细处理提供了优厚条件和用机保障。

(6) 从资料解释和综合研究上分析:在渤海湾盆地,尽管钻至 3500 m 以下的探井为数不多,能够应用于进行深层区域地质研究的高质量地震剖面较少,影响着深层资料的综合解释。但是,经过数十年对浅、中层资料解释和综合研究,新的解释系统和综合研究方法有了长足的进步。人机联作解释系统和制图系统、可视化综合研究系统、层位综合标定技术、地震模型技术、时频分析技术划分地层沉积旋回、构造平衡剖面的制作及应用技术等等^[17~19],为开展深层地震勘探技术研究提供了条件。

总而言之,经过数十年的积累,我国的各个油田都有一支技术和作风过硬的勘探队伍和较强的研究力量。特别是近年来,各种新的采集、处理、解释方法得到了长足的进步和广泛的推广应用,大量的先进软件和硬件系统投入到了生产第一线,所有这些,无疑为开展深层地震勘探提供强有力的保证。也充分地说明,开展深层地震勘探研究是可行的。

第二节 国内外开展深层地震勘探的现状

近几年,有不少研究机构和生产单位纷纷在深层勘探领域进行了尝试或是工业生产。在国外,美国的 G L Kinsland 等人用高分辨率地震勘探在路易斯安那州成功获得了深部薄砂层的图像,勘探目的层是深 4084 m 左右处的 Cibjeff 砂层。具体实施过程中,应用精心设计的高分辨三维地震勘探,勘探设计应用十字排列法,震源线和检波线成一定的角度,

用可控震源激发, 1024 道记录系统接收。采集的总地震道数为 1.38×10^6 。在资料处理中, 做了多次试验, 选用偏移数据体中主能量优化叠加技术, 成功地获得了 Cibjeff 砂层的精细图像。经过三维数据体的精细解释以后, 发现西部的边界断裂位置已西移, 同时还进一步确定了经过储集层的其他断裂^[20]。

我国的胜利、辽河、大庆、新疆、中原、大港、华北、江苏等多家油田单位也先后在各自的勘探辖区内开展了深层地震勘探方法研究和勘探技术研究, 获得了宝贵的第一手资料^[21,22]。深层地震勘探技术已成为我国石油发展战略的一个极有前景的新增长点。

深反射地震资料处理的关键是从干扰背景中提取和增强深层弱有效信号, 提高剖面的信噪比、分辨率和保真度。深反射地震剖面的解释要着眼于大的地质构造运动和成因, 运用地质规律进行综合地质解释。在解释中, 通过分析和研究某些相干干扰波的形成和特点, 有助于对深反射地震剖面进行可靠的地质推断解释。

“十五”期间, 中国石化集团公司和石油天然气集团公司都确立了东部深层地震攻关技术的重点研究项目, 我国东部各油田基本上都参与此项技术的攻关。胜利油田有限公司物探公司围绕着深层地震勘探的激发、接收和观测方式做了大量的试验研究, 确立了以单束线状和二维可变面元方法施工, 即: 采集小面元、处理用面元叠加技术来提高面元叠加次数, 达到增加下传能量的目的; 采用多级延迟爆炸等新型震源激发方式来增强下传能量, 得到良好的深层反射信息。在深层资料处理方面, 采用叠前拟三维去噪(使用非线性波场变换与分离方法压制面波; 采用叠前主分量重建技术衰减随机干扰)、精细速度分析、高精度 CMP 面元叠加等方法, 改善了深层资料的质量, 取得较好的效果。在深层资料解释方面, 在地质规律研究的基础上, 详细研究了探区的速度变化规律和速度模型, 充分利用地震、地质、测井等多种信息, 综合分析探区深层的构造、沉积特征、圈闭条件和深层的成藏规律, 通过精细解释提出钻探目标, 取得了良好的经济效益, 并积累了很好的经验^[23~25]。

新疆石油局地调处近几年在准噶尔盆地沙漠区为获得 5000 m 以下深层地震反射信息进行了一系列方法试验^[26]。结果表明, 浅井组合、可控震源激发、弯线排列、沙丘曲线、初至叠加和炮道静校下正是获得深反射信息的基本手段; 径向信号增强、多项式拟合去噪方法对于提高信噪比有明显作用; 宽线叠加对于查清二叠系与下伏地层的接触关系、压制层间多次波有明显作用^[27]。

在江苏油田, 针对深层反射能量弱的特点, 在激发上要注重加强低频微弱信号, 有条件时可以开展人工控制震源信号频谱。针对苏南地表复杂的特点, 在起伏较大的地区, 接收上注意了每道的检波器串的埋置, 不宜采用过大的面积组合。由于新生界地层倾角相对变化小, 一般采用增大排列长度来压制多次波。要有足够大的炮检距, 以穿透后部的屏蔽带, 取全地下地质信息, 排列的长度原则上依最大目的层深度而定。在地质条件复杂的地区水平叠加, 不应应对 CMP 道集内的道, 笼统叠加形成一个 CDP 道, 而应有选择地进行分层选道叠加。才能有效地提高复杂地区水平叠加成像问题。

第三节 开展深层勘探的目的和意义

深层油气勘探是中浅层油气田进入成熟期后的必然趋势。根据有关地质材料说明环渤

海湾深层较国内其他盆地深层油源丰富^[28,29], 区域石油地质研究已经表明济阳拗陷深层具备较好的油气生储盖条件, 尤其是东营凹陷、沾化凹陷、惠民凹陷深层油气最具希望。从济阳拗陷深层油气资源量分析, 足以说明济阳拗陷深层油气资源是十分丰富的, 据统计, 济阳拗陷深层(老第三系的孔店组、二叠系到石炭系), 油资源量可达 7×10^9 t, 天然气资源量达到 4.22×10^{13} m³, 煤气资源量达到 6.65×10^{13} m³, 是胜利油田今后一个历史时期内生存与发展的基础。但由于以往采集方法主要针对中浅层的地质目标, 其深层资料大都呈现出低信噪比、质量差, 而不能满足深层构造解释的需要。因此, 要搞清深层地质构造, 寻找深层油气藏, 必须进行针对深层地质特点展开采集和处理方法研究, 以求获得用于资料解释的地震资料, 为我国东部地区的持续稳定和发展提供支持。

随着我国国民经济稳定增长, 对石油需求不断提高。1993年起我国就已跨入原油净进口国之列, 当年的进口量达到 9.98×10^6 t, 以后每年递增, 到2000年我国石油净进口量达到 7×10^7 t。我国对国外石油资源的依赖程度将从1999年的20%上升到30%。专家预测, 如果勘探上没有重大进展和重大技术突破, 到2010年, 我国石油供求缺口将接近 1.2×10^8 t, 石油的自给率将滑向50%, 这对国家将存在更大的经济安全问题, 这更应促使加强深层地震勘探, 从深层找出更多的石油储量, 从这里说明了深层地震勘探采集与处理方法研究的重要意义。

开展深层地震勘探采集和处理方法研究的目标就是要根据我国东部地区沉积盆地的特点, 闯出一条能够适应深层地震勘探的配套技术, 并获得能够解决深层或深部复杂地质认识规律的地震剖面, 为深层油气勘探综合研究提供可靠的资料, 开创我国东部地区深层油气勘探新局面。特别是在环渤海湾地区足以找出若干个大中型深层油气田。由此可见, 开展深层采集和处理方法研究, 是推动我国东部地区石油勘探二次创业的前奏, 其经济效益和社会效益十分巨大。

第二章 地震波传播中吸收和衰减规律

在深层地震勘探中，如何获取来自深层有效反射信号是深层攻关的一个难题。要研究深层地震勘探采集，首先必须研究地震波在地下介质中的传播与衰减规律，才能有效地研究如何增强地震波在地下介质中传播的能量和减少传播过程中能量的衰减。

第一节 地震波传播中吸收和衰减规律分析

一、影响反射波振幅的因素

地震记录的形成，要经历震源激发产生地震波，地震波在地下传播，地震波返回地面被检波器接收，最后被仪器记录下来这样一个过程。地震记录实际上是同时到达检波器的各种波叠加的结果。因此，地震波从激发到最终形成地震记录是一个十分复杂的过程，这个过程中会产生地震波能量的变化，也就是说会发生地震波振幅的变化。振幅的变化与许多因素有关。比如：震源强度与耦合、球形扩散、反射系数、叠加在一起的噪音、反射系数随入射角的变化、吸收、反射层弯曲与粗糙、薄层微屈多次波、透射损失、散射、组合方向、同相轴之间的干扰、检波器灵敏度与耦合、组合方向、设备均衡等^[30]。

下面将影响反射波振幅的主要因素做一简要分析：

(1) 激发条件：理论研究和生产实践表明，野外激发产生的地震波初始振幅与介质的切变模量 μ 成反比，根据纵波速度与介质弹性参数的关系式： $v_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho}$ ，可知 $\mu = (\rho v_p^2 - \lambda) / 2$ ，此式表明，介质波速越高、密度越大，激发产生的初始振幅越小。在含水砂层或粘土中激发要比在坚硬岩石中激发所获得的能量强。由于低速带的密度小，波速慢，造成能量的吸收严重，应该在其下激发。井深需要考虑表层地层的吸收特性，然后结合其他因素来确定。

(2) 接收条件：包括检波器类型（不同类型的检波器，其频率特性及灵敏度都不一样），检波器的组合方式，记录仪器的频率特性等。这些因素对一炮记录而言可视为是相同的，可用一个常数因子来表示。

(3) 微屈多次波：当地震波通过薄层组时，会产生微屈多次波。由于微屈多次波的量讨论十分困难，很难将它对振幅影响的程度计算清楚。

(4) 各种噪音的干扰：噪音对振幅的影响是多种多样的，可以有多种方法进行压制，但是很难完全消除，因此野外生产时要注意排除可以避免的各种干扰。

(5) 波前扩散：是指地震波由震源向四面八方传播所散布的面积，即波前面的面积越来越大，虽然总能量不变，但单位面积上的能量却越来越少，因而振幅也就变小。假定地震波在介质中的传播速度为 v ，那么在 t 时刻的波前面就是一个以 $r = vt$ 为半径的球面，地震波的能量就分布在这个球面上。由于球面上单位面积的能量与地震波传播距离的平方成反比，能量与振幅的平方成正比；所以，地震波的振幅就与传播的距离 r 成反比。因

此,可根据不同介质模型,确定其相应的传播速度,就可定量计算其波前扩散因子,以便对地震波振幅作波前扩散补偿。

在均匀介质中,震源为点源时,波前面是球面,随着传播距离的增大,球面也逐渐扩大。如果从震源发出的总能量不变,随着传播距离的增大,单位面积上的能量相对就减少,这就是球面扩散或称几何发散。

$$\text{球面发散因子为: } D_d = \frac{1}{r} = \frac{1}{vt}。$$

即:地震波的振幅与传播距离或旅行时间成反比,其中: v 为波的传播速度; t 为旅行时间; r 为传播距离。

在均匀层状介质时,球面发散因子为: $D_d = \frac{v_1}{v^2 t}$,其中: v_1 为第一层介质的波速; t 为垂直入射的反射波的传播时间; v^2 为对应于反射波旅行时间 t 的均方根速度。

在连续介质时,球面发散因子为: $D_d = \frac{v_0}{v^2 t}$,其中: v_0 为 $Z=0$ 时,地表附近的波速; t 为地震波通过整个连续介质的传播时间; v^2 为连续介质的均方根速度。

能量比和能量强度常用分贝表示: $D = 10 \lg \frac{E_2}{E_1} = 10 \lg \frac{I_2}{I_1}$,其单位为分贝(dB)。由于能量与振幅的平方成正比,又可以表示为: $D = 20 \lg \frac{A_2}{A_1}$ 。若用自然对数,则: $D = 8.686 \times \ln \frac{A_2}{A_1}$,其单位为分贝(dB)。

(6) 中间界面的能量分配:如果一个界面两边介质的密度、纵波和横波速度已知,入射角已知的纵波,根据斯内尔定律可以求得反射角和透射角以及转换波的反射角和透射角。如果入射振幅已知,由 Zoeppritz 方程组可以求出反射波和透射波的振幅。

(7) 反射界面形态产生的聚焦和发散作用:当地震波入射到弯曲界面时,反射振幅受界面曲率的影响发生变化。反射界面向下凹时,反射波能量集中,振幅增强;界面凸时,反射波能量分散,振幅减弱。

(8) 岩相的变化:岩相的横向变化通常会引起界面反射系数的横向变化,因而影响反射波的振幅。

(9) 波的干涉:当反射波与其他波同时到达地面检波器时,会引起波的干涉。

二、地下介质吸收与衰减规律分析^[13,31]

当地震波在地下介质中传播时,吸收与衰减是影响地震反射波振幅的重要因素。由于实际的岩层是不完全弹性的,这就导致地震波的一部分弹性能量不可逆地转化为热能而消耗,因而使地震波的振幅产生衰减,这种现象称之为介质的吸收与衰减。波的吸收与衰减机制众说不一,比如,弹性后效理论、内摩擦理论、磁滞、压电效应等。其中:弹性后效理论和内摩擦理论比较可信。然而有一点是大家公认的,就是高频成分的吸收要比低频成分快,深层反射波的频率较浅层反射波的频率低,这在任何一张地震记录上都足以见到。

1. 岩石对地震波的吸收作用

根据弹性粘滞理论,由均匀的非完全弹性介质所产生的吸收作用,将使地震波的振幅

随传播距离的增大呈指数规律衰减, 即:

$$A = A_0 e^{-\alpha r} \quad (2-1)$$

式中: A 为传播到距离 r 处的振幅; A_0 为初始振幅; α 为吸收系数。

吸收的另外一种表达形式是振幅随时间的衰减。为了把它和吸收系数联系起来, 假设波是周期性的。

$A = A_0 \times e^{-ht} \times \cos(2\pi ft)$, 它表示在某一个固定位置的吸收, h 称为阻尼因子。

2. 对数衰减 δ 是弹性波每传播一个周期, 其振幅比值的自然对数

$$\delta = \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) \quad (2-2)$$

用阻尼因子来表达, 有:

$$\delta = hT = \frac{h}{f} = 2\pi \frac{h}{\omega} \quad (2-3)$$

其中, T 是周期。

3. 品质因子 Q 是岩石对于弹性波吸收特性的一种表达方式

$$Q = 2\pi \frac{E}{\Delta E} \quad (2-4)$$

因为能量与振幅的平方成正比, $E = E_0 e^{-2ht}$, $\frac{\Delta E}{E_0} = 2h\Delta t$, 令 $\Delta t = T$, 得到:

$$Q = \frac{\pi}{hT} = \frac{\pi}{\delta} \quad (2-5)$$

在一个周期内, 波传播的距离是一个波长。如果能量的衰减完全是由吸收造成的, 就有 $h \times T = \alpha \times \lambda$, 所以吸收系数 α 、对数衰减量 δ 、品质因子 Q 三者之间的关系就是:

$$Q = \frac{\pi}{\alpha\lambda} = \frac{\omega}{2\alpha f} = \frac{\pi}{\delta} \quad (2-6)$$

上述过程还可用品质因子 Q 的倒数 (2-4) 式来讨论, 它表示地震波能量在一个周期或一个波长上的相对变化, 即:

$$\frac{1}{Q} = 2\pi \frac{\Delta E}{E} = \frac{A_0^2 - A^2}{2\pi A_0^2} = \frac{1 - (A^2/A_0^2)}{2\pi} = \frac{1 - e^{-2\alpha\lambda}}{2\pi} \quad (2-7)$$

对上式中分子的指数部分作级数展开, 并略去高次项, 可得:

$$\frac{1}{Q} = \frac{\alpha\lambda}{\pi} = \frac{\alpha v}{\pi f} \quad (2-8)$$

或改写为:

$$\alpha = \frac{\pi f}{Qv} \quad (2-9)$$

上式证明了吸收系数 α 与品质因子 Q 的相互关系, 同时也说明吸收系数 α 与频率 f 的一次方成正比。当频率 f 和速度 v 一定时, 吸收系数 α 与品质因子 Q 成反比关系。在实际地层中, 表层的吸收系数相对较大, 则 Q 值就小; 而对于中深层地层, 吸收系数 α 较小, 则 Q 值就很大。

根据以上关系, 如果用 D 来表示地震波振幅的衰减, 即:

$$D = 20\lg(A/A_0) = 20\lg(e^{-Q^{-1}\pi f t_0}) = -27.29Q^{-1}ft_0 \quad (2-10)$$

式中： t_0 为地震波的双程旅行时，各分层的 Q 值可利用李庆忠院士提出的经验公式来计算，即： $Q \approx 1.4v_n^{2.2}$ ；上式中 v_n 为层速度，单位用 km/s 。

一般情况下，平面波在均匀吸收介质中随传播距离的增加呈指数衰减。其数学表达式为： $D_a = \frac{A}{A_0} = e^{-\beta t}$ ，其中： A_0 为震源发出的地震波的初始振幅； A 为地震波传播时间 t 时的振幅； $\beta = \omega$ 为介质的衰减系数； v 为地震波在介质中的传播速度； α 为吸收系数。

均匀层状介质为： $D_a = e^{-\bar{\beta}t}$ ，其中， $\bar{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}$ ； $t = \sum_{i=1}^n t_i$ 为地震波通过 n 层介质的传播时间； $\beta_i = v_i \alpha_i$ 为第 i 层的衰减系数； α_i 为第 i 层的吸收系数。

连续介质为： $D_a = e^{-\bar{\beta}t}$ ，其中： $\bar{\beta} = \frac{1}{t} \int_0^t \beta(z) dt$ ； t 为地震波通过整个连续介质的传播时间； $\beta(z) = v(z) \alpha(z)$ 为深度 z 的衰减系数。

从上面的分析中可看到，地层对地震波振幅的吸收衰减具有空变特性。纵向上，地表附近的低降速带的 Q 值相对较小，随着埋深或层速度的增大， Q 值相对增大；横向上，炮检距越大，相对而言衰减也越大，因此远道振幅的衰减比近道的更厉害。 Q 值的这种横向变化目前很难定量描述它。

关于地震波能量的吸收衰减补偿，目前主要利用地震资料数字处理中的反 Q 滤波方法， Q 值的估计可采用李庆忠院士的经验公式，也可利用频谱比方法提取的 Q 值。 Q 补偿的主要目的是拓宽有效地震频带，以便提高地震资料的分辨率。在地震资料的野外采集方面，应尽量避免地表附近的低降速带的影响，选取合理、有效的激发和接收条件，保证下传的地震波能量足够大，但目前无论在野外采集方面，还是在资料的数字处理方面，完全解决这个问题还存在一定的难度，需要做进一步的研究。

4. 影响岩石吸收特性的因素

综合上述影响岩石吸收特性的因素有以下几个方面：

- a) 温度与压力的增大会使吸收减少， Q 增大；
- b) 震源附近，波动振幅很强，吸收强烈， Q 很小；
- c) 岩性的影响——灰岩吸收小，砂岩吸收大，泥岩介于其中；
- d) 岩石中的孔隙形状与裂缝发育程度也极大地影响 Q 值的变化；
- e) 频率不同， Q 值不同；
- f) 饱和度与液体性质，对于纵波，随含水量的增加吸收增加；
- g) 孔隙中流体的性质如粘度对吸收也有影响。

第二节 地震波的吸收与衰减规律数值模拟结果分析

根据某地区的典型剖面制作了三个模型。对各反射层对应的反射时间 t 、层速度 v_n 、品质因子 Q 、地震主频 f ，分别计算出了三个模型的均方根速度 v_{rms} 、衰减系数 $\beta = \pi f / Q$ 和各个等效参数，其计算结果如表2-1所示。

表 2-1 三模型的地震参数一览表

模型一					
层序号	1	2	3	4	
反射时间 t/s	0.9	2	2.7	3.2	
层速度 $v_n/(m \cdot s^{-1})$	2200	2600	3500	4600	
均方根速度 $v_{rms}/(m \cdot s^{-1})$	2200	2428	2746	3110	
品质因子 Q	80	150	200	380	
主频 f/Hz	40	30	20	12	
衰减系数 β	1.57	0.63	0.31	0.1	
等效参数	$v_{rms} = 3062, Q = 180, f = 20, \beta = 0.35$				
模型二					
层序号	1	2	3	4	
反射时间 t/s	0.9	1.7	2.5	3.4	
层速度 $v_n/(m \cdot s^{-1})$	2200	2500	3700	4500	
均方根速度 $v_{rms}/(m \cdot s^{-1})$	2200	2346	2850	3366	
品质因子 Q	80	130	200	380	
主频 f/Hz	40	30	20	12	
衰减系数 β	1.57	0.72	0.31	0.1	
等效参数	$v_{rms} = 3235, Q = 190, f = 20, \beta = 0.33$				
模型三					
层序号	1	2	3	4	5
反射时间 t/s	0.8	1.4	2	2.7	3.2
层速度 $v_n/(m \cdot s^{-1})$	2000	2300	2900	3200	4200
均方根速度 $v_{rms}/(m \cdot s^{-1})$	2000	2134	2390	2624	2927
品质因子 Q	70	110	190	220	300
主频 f/Hz	45	40	30	20	12
衰减系数 β	2.02	1.14	0.5	0.29	0.13
等效参数	$v_{rms} = 3813, Q = 200, f = 20, \beta = 0.31$				

在此,通过射线追踪法模拟,定量表征了几种主要非地质因素的影响,其中包括吸收衰减、波前扩散、透射损失。同时也考虑了反射系数的影响。各层模拟的反射振幅和震源子波振幅的最大值如表 2-2 所示,三模型的反射能量随反射时间的变化规律分别在图 2-1、2-2、2-3 中绘出。

表 2-2 三模型各层模拟的反射振幅和震源子波振幅的最大值

震源子波的最大 振幅为 2268	层序号	1	2	3	4	5
	模型一	50	17	7.1	1.3	
	模型二	38.2	31.6	5.98	1.74	
	模型三	39	16	2.8	4	1.6

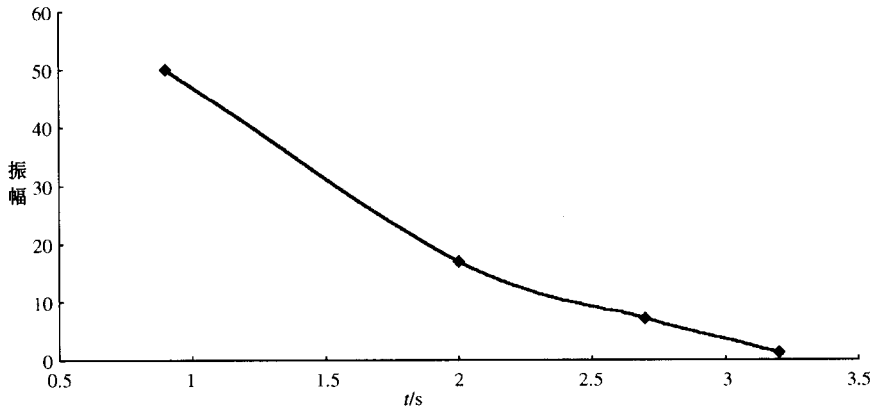


图 2-1 模型一-振幅随旅行时的变化曲线

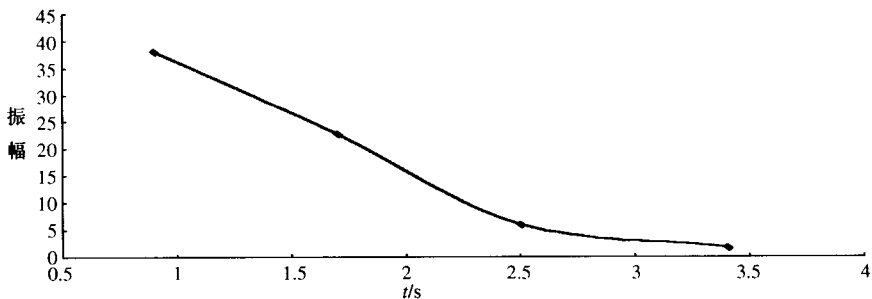


图 2-2 模型二-振幅随旅行时的变化曲线

通过对三个模型的深层反射模拟得出了如下几点认识:

(1) 反射振幅随反射时间的变化基本上呈指数衰减规律,通过增加覆盖次数可以提高深层反射能量,只要深层具有一定的信噪比,考虑到目前地震仪的记录动态范围都在 120

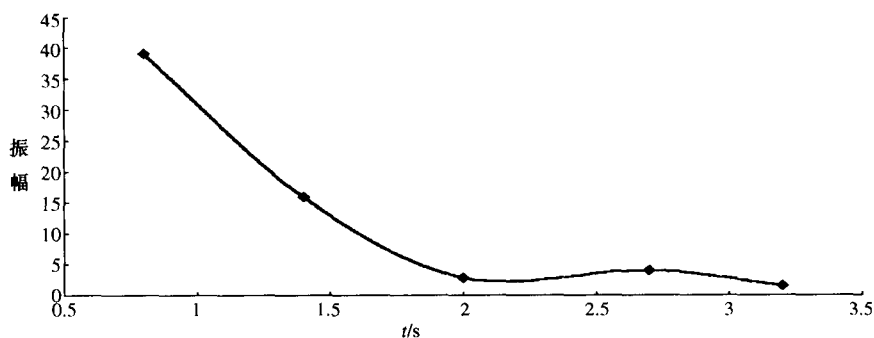


图 2-3 模型三-振幅随旅行时的变化曲线

dB 以上，因此完全可以记录到深层反射信号。

(2) 由图 2-3 或表 2-2 模型三的第三层反射振幅小于第四层可以看出：第三层底面是一波阻抗反差较小的界面，大部分能量发生透射，反射能量较小，而第四层底面是一强波阻抗界面，大部分能量被反射，透射能量较小，因此，高速层或低速层会成为能量屏蔽层，而使下传能量减小。为此，可采用小炮检距勘探、折射波勘探、广角反射勘探或综合应用上述几种勘探方法，也能解决记录深层反射信号问题。

(3) 在模拟中出现的深层反射能量在横向上的不均匀甚至不连续充分说明了三地区地质模型的复杂性。

第三节 地震波传播中吸收和衰减模型建立及分析

实际上，地震波在传播过程中能量变化仍是比较复杂的。要分析地震波在实际传播过程中的吸收和衰减变化情况。首先根据声波测井和 VSP 测井资料进行详细分层，确定每一层的层速度，建立层速度剖面，建立一个大致符合实际的吸收衰减模型。其次，通过计算深层地层衰减与吸收系数，进行深层反射波特征研究。为此，选择胜利探区渤南凹陷作为地震波传播中吸收与衰减模型建立及实际计算。

一、地震波传播中吸收和衰减模型建立

地震波在每层介质中的速度不同，每层介质的密度也不同，从而影响到介质对地震波的吸收、反射系数、透射系数等的变化；另外由于地层厚度差异，导致几何扩散影响程度的变化。这些因素是众多影响地震反射波振幅的因素中主要的因素。

将 Z 定义为波阻抗，有： $Z_i = \rho_i \times v_i$ 。研究表明，界面两侧的介质的波阻抗只有在不相等的情况下地震波才会发生反射，并且两者差别愈大，反射波愈强。因此，只有波阻抗界面才是反射界面，速度界面不一定是反射界面。

根据这个原则，结合 VSP 测井资料、声波测井曲线、综合录井图、地质分层建立一个 Y161 井的分层剖面（表 2-3、图 2-4）。然后，研究每一层的纵波速度的变化；确定每一层的地球物理参数比，如密度等，从而建立一个大致符合实际的吸收衰减模型。