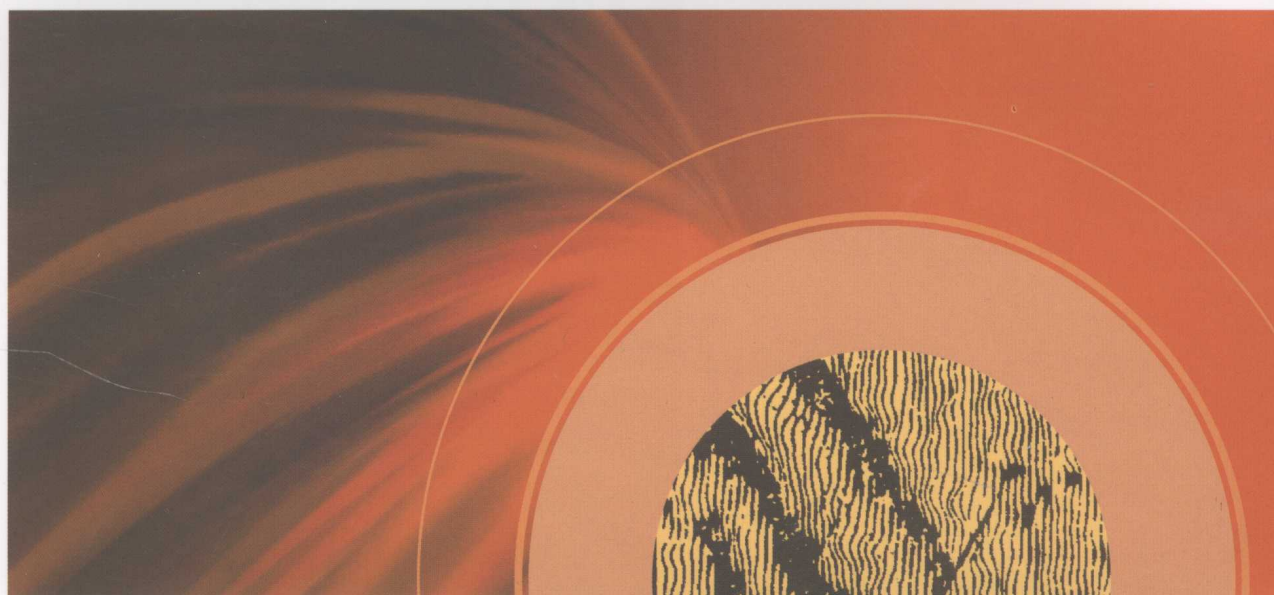




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

FANSHEBO DIZHENKANTAN YUANLI HE ZILIAO JIESHI

# 反射波地震勘探 原理和资料解释



● 张玉芬 编

地质出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
中国地质大学“十一五”教材建设项目资助

# 反射波地震勘探原理 和资料解释

张玉芬 编

地质出版社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

本书是作者汲取了教学和科研实践中的经验编写而成的。全书共分七章，系统地介绍了地震勘探的基本原理、野外地震勘探的方法和技术、地震勘探的数据处理以及地震资料的构造、岩性和地震地层解释等内容。

本书内容充实、先进，章节结构合理，注重对地震勘探有关概念的阐述，强调地震勘探的采集、处理和解释工作的有机联系；突出物探意义的论述，避免了繁琐的数学公式推导，便于读者阅读和理解。

本书可供地质类专业的大学生、硕士研究生用作教材，也可供从事油气勘探、开发的地质、物探工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

反射波地震勘探原理和资料解释/张玉芬编. —北京:  
地质出版社, 2007.7

ISBN 978-7-116-05330-4

I. 反... II. 张... III. 地震反射波法 IV. P631.425

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 079745 号

---

责任编辑：陈军中

责任校对：王素荣

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)

网 址：<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱：zbs@gph.com.cn

传 真：(010) 82310759

印 刷：北京中新伟业印刷有限公司

开 本：787 mm × 1092 mm <sup>1</sup>/<sub>16</sub>

印 张：15.25

字 数：350 千字

印 数：1—3000 册

版 次：2007 年 7 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价：20.00 元

书 号：ISBN 978-7-116-05330-4

---

(如对本书有建议或意见，敬请致电本社；如本书有印装问题，本社负责调换)

# 前 言

本书是供高等学校石油地质、石油天然气地质、油藏工程地质等专业学生使用的通用教材。编者在多年教学实践基础上，结合当前地震勘探的现状和发展，据对高等学校上述专业学生“三基”的基本要求，在原《石油地震》（1993年，内部使用教材）的基础上重新编写了本教材，它适用教学时数约40~60学时。

作为石油地质、石油天然气地质、油藏工程地质等专业的教材，地震勘探资料的地质解释和应用自然是其重点。地震勘探技术的迅速发展，其解释方法及解释手段等亦不断前进和变化，详解地震勘探基本内容和新进展内容，篇幅将十分可观；为了使同学们能在较短的学时内掌握最基本的技术，编者对讲授内容进行了认真精选，确定主要以反射波法、构造解释为主线进行选材。

随着石油勘探的发展，地震勘探方法在石油勘探中的作用和地位显得越来越重要。对于石油地质工作者而言，不能只是对地震勘探有一般性的了解，而应该深入地理解和掌握地震勘探的基本原理和基本技术，只有这样才能比较正确地应用和解释地震勘探资料。根据这一思想，本教材在基础理论部分（特别是时距曲线和多次覆盖理论）相比原来内容有所加强，并适当介绍一些最基本的数字处理方法。

编写本教材的另一个重要指导思想是考虑石油地质、石油天然气地质、油藏工程地质等专业学生的特点，在章节编排、内容取舍等方面均作了较详细的考虑，大胆地舍去了不少与石油地质专业关系不太大的内容，补充了一些石油地质专业学生学习地震勘探必需的基础知识，避免繁琐的数学推导，强调物理概念，强调“三基”，强调目的（即应用）；尤其是在地震资料的地震地层的解释、地震岩性解释、三维地震勘探方面增加了一些新的内容。由于编写时间较短，编者水平有限，能否达到此目的还有待实践的考验、读者的评说。

本教材共分七章，其中绪论、第一、二、三、四、六章和第七章由张玉芬编写，第五章由姚姚编写。限于编写者水平，书中一定存在不少问题，欢迎读者指正。

编者

2006年8月于武汉

# 目 次

## 前 言

绪 论	(1)
一、地球物理勘探及特点	(1)
二、地震勘探的原理及方法	(1)
三、地震勘探在石油勘探中的作用	(4)
四、地震勘探的发展概况	(4)
习题与思考题	(5)
第一章 地震勘探的理论基础	(6)
第一节 岩石的弹性	(6)
第二节 地震波的基本概念	(8)
一、地震波的形成	(8)
二、地震波的基本类型	(9)
三、地震波的描述	(11)
第三节 地震波的速度	(14)
一、地震波的速度	(14)
二、影响地震波速度的地质因素	(15)
三、速度分布规律及特点	(18)
四、地震介质的近似	(19)
第四节 地震波的传播规律	(20)
一、地震波传播的基本原理	(20)
二、地震波在分界面上的传播规律	(21)
三、地震波在均匀介质中的传播规律	(26)
四、地震波在水平层状介质中的传播规律	(27)
五、地震波在连续介质中的传播规律	(28)
第五节 地震波的动力学特点	(31)
一、地震波的频谱及特点	(31)
二、地震波的振幅	(36)
小 结	(40)
习题与思考题	(40)

<b>第二章 地震波时距曲线</b> .....	(43)
<b>第一节 反射波时距曲线</b> .....	(43)
一、时距曲线的概念及意义 .....	(43)
二、单个平界面时共炮点反射波时距曲线 .....	(44)
三、平界面时共反射点 (CRP) 反射波时距曲线 .....	(49)
四、水平层状介质时反射波时距曲线 .....	(52)
五、连续介质时反射波时距曲线 .....	(56)
<b>第二节 多次反射波时距曲线</b> .....	(57)
一、产生多次波的地质条件及多次波的类型 .....	(57)
二、全程多次反射波时距曲线方程及特点 .....	(57)
<b>第三节 绕射波时距曲线</b> .....	(59)
一、产生绕射波的地质条件 .....	(59)
二、断棱绕射波时距曲线方程及特点 .....	(60)
<b>小 结</b> .....	(62)
<b>习题与思考题</b> .....	(62)
<b>第三章 地震资料的野外采集</b> .....	(65)
<b>第一节 地震勘探的测线布置及试验性工作</b> .....	(65)
一、地震测线布置的原则 .....	(65)
二、试验工作 .....	(65)
<b>第二节 地震波的激发</b> .....	(66)
一、地震勘探对激发条件的基本要求 .....	(66)
二、震源类型 .....	(66)
三、纵波的激发 .....	(68)
四、激发横波的有关问题 .....	(68)
<b>第三节 地震勘探的野外采集系统——地震仪器简介</b> .....	(69)
一、地震勘探对地震仪器的基本要求 .....	(69)
二、数字地震仪的组成 .....	(70)
三、地震仪记录系统功能简介 .....	(70)
四、地震仪回放系统功能简介 .....	(72)
<b>第四节 地震勘探野外观测系统</b> .....	(72)
一、观测系统的术语 .....	(73)
二、观测系统的图示法 .....	(73)
三、单次覆盖的观测系统 .....	(75)
四、观测系统因素的选择 .....	(75)
<b>第五节 地震勘探中的组合法</b> .....	(76)

一、组合的方向特性 .....	(76)
二、组合的频率特性 .....	(78)
三、组合的统计效应和平均效应 .....	(79)
四、组合参数的选择 .....	(79)
第六节 地震波速度的野外测定 .....	(80)
一、地震速度测井 .....	(80)
二、地震声波测井(连续速度测井) .....	(81)
三、低速带的测定 .....	(82)
第七节 地震地质条件 .....	(82)
一、表层地震地质条件 .....	(83)
二、深部地震地质条件 .....	(84)
小 结 .....	(85)
习题与思考题 .....	(86)
第四章 共反射点多次叠加法 .....	(87)
第一节 共反射点多次叠加法的基本原理 .....	(87)
第二节 共反射点多次叠加的叠加效应 .....	(89)
一、水平界面一次反射波的叠加效应 .....	(89)
二、水平界面多次反射波的叠加效应 .....	(89)
三、倾斜界面一次反射波的叠加效应 .....	(90)
四、绕射波的叠加效应 .....	(91)
五、随机噪声的叠加效应——共反射点叠加法的统计效应 .....	(93)
第三节 影响共反射点叠加效果的因素分析 .....	(93)
一、动校正速度误差对叠加效果的影响 .....	(94)
二、界面倾斜对叠加效果的影响 .....	(94)
第四节 共反射点多次叠加与组合检波的关系 .....	(95)
一、利用地震道之间的时差规律不同 .....	(95)
二、地震道所得到的反射点不同 .....	(95)
三、压制干扰波的原理和类型不同 .....	(95)
第五节 多次覆盖的观测系统 .....	(96)
一、多次覆盖的观测系统 .....	(96)
二、多次覆盖观测系统参数的选择 .....	(98)
习题与思考题 .....	(99)
第五章 反射波地震资料的数字处理 .....	(100)
第一节 常规水平叠加基本处理 .....	(100)
一、常规水平叠加资料处理流程 .....	(100)
二、预处理 .....	(101)

三、动校正（正常时差校正）处理	(102)
四、静校正处理	(103)
五、叠加处理和水平叠加时间剖面	(105)
六、修饰性处理	(106)
第二节 数字滤波	(107)
一、数字滤波的基本概念	(107)
二、地震记录的时间域表示和频率域表示	(108)
三、一维频率滤波	(108)
第三节 反滤波	(111)
一、反滤波的基本概念	(111)
二、反滤波因子的求取	(111)
三、反射波地震资料数字处理中的反滤波	(112)
第四节 速度分析——叠加速度谱	(115)
一、叠加速度谱制作的原理和方法	(115)
二、速度谱的显示形式	(116)
三、速度谱的应用	(116)
四、叠加速度的解释	(118)
第五节 偏移归位	(118)
一、偏移归位的概念	(118)
二、偏移归位方法	(119)
附录 A 傅里叶级数及傅里叶变换	(121)
附录 B 采样及采样定理	(125)
习题与思考题	(126)
第六章 二维反射波地震资料的解释	(127)
第一节 反射波信息及其解释方法种类	(127)
一、运动学信息及其构造解释	(127)
二、动力学信息及其地震岩性解释	(128)
三、反射波特征信息及其地震地层解释	(128)
第二节 地震反射资料的构造解释	(128)
一、地震剖面与地质剖面的关系	(129)
二、地震反射时间剖面的对比	(131)
三、水平叠加时间剖面上的特殊波	(134)
四、时间剖面的地质解释	(138)
五、深度剖面、构造图及等厚图的绘制及解释	(152)
第一节、第二节习题与思考题	(161)
第三节 地震反射信息的地震地层解释	(162)



一、地震层序划分 .....	(162)
二、地震相分析 .....	(165)
三、地震相的地质解释 .....	(171)
四、地震地层解释方法部分应用简介 .....	(176)
第四节 地震信息的岩性解释与烃类检测技术 .....	(182)
一、地震信息的岩性解释 .....	(182)
二、地震烃类解释 .....	(188)
小 结 .....	(197)
第三节、第四节习题与思考题 .....	(198)
<b>第七章 其他地震勘探方法及技术简介 .....</b>	<b>(199)</b>
第一节 合成地震记录和合成声波测井技术 .....	(199)
一、合成地震记录 .....	(199)
二、合成声波测井(拟测井) .....	(200)
第二节 振幅随炮检距变化(AVO)的研究 .....	(202)
一、AVO研究的理论基础 .....	(202)
二、AVO研究技术中特殊的资料处理方法 .....	(203)
三、AVO资料的分析和应用 .....	(204)
第三节 垂直地震剖面(VSP)技术 .....	(207)
一、垂直地震剖面法的野外采集 .....	(207)
二、垂直地震剖面法资料处理 .....	(208)
三、垂直地震剖面的解释和应用 .....	(209)
第四节 横波地震勘探 .....	(210)
一、横波勘探原理 .....	(210)
二、横波资料野外采集 .....	(210)
三、横波资料的解释和应用 .....	(211)
第五节 三维地震勘探 .....	(214)
一、三维地震勘探与二维地震勘探的差别及特点 .....	(214)
二、三维地震资料的野外采集 .....	(217)
三、三维地震勘探资料处理 .....	(219)
四、三维地震勘探资料的解释 .....	(222)
<b>主要参考文献 .....</b>	<b>(234)</b>
<b>主要参考资料 .....</b>	<b>(234)</b>

# 绪 论

## 一、地球物理勘探及特点

随着社会生产和科学技术的发展,人类对能源的需求日益增长。为了满足社会发展的需要,必须寻找出更多的能源。大家知道,目前勘探能源(如勘探石油、天然气等),可以通过地面地质调查,对地质资料进行综合分析,研究勘探地区的石油地质规律,指出含油气的有利地区,这就是地质法。应用这种方法,研究的深度是有限的,如遇没有地质露头的地区或海洋上,这种方法就受到了很大的限制。如果大量钻井,通过取岩心的方法来了解地下地质情况,不仅成本高,效率也很低。为此就要求有一种方法,既能反映地下深部的地质情况,又能做面积测量,从而能够获得勘探地区区域地质和含油气情况;地球物理勘探,就是在这种情况下被广泛采用的,它已成为寻找石油及天然气等能源的主要手段之一。

地球物理勘探(简称为物探)是以岩石、矿石(或地层)与其围岩的物理性质差异为物质基础,用专门的仪器设备观测和研究天然存在或人工形成的物理场的变化规律,进而达到查明地质构造、寻找矿产资源和解决工程地质、水文地质以及环境监测等问题的勘探方法。地球物理勘探之所以能达到上述目的,是由于它依据地下存在着不同岩石,这些岩石的物理性质不同,从而产生不同的物理场。我们在地表,利用各种精密仪器将它测量下来,然后对这些场进行分析研究,作出解释,从而了解地下构造、岩性等,达到寻找石油、天然气等目的。

按物性依据不同,地球物理勘探有不同的勘探方法。以岩石的密度差为依据,用重力仪测量由它引起的重力场变化的方法,称之为重力勘探;以岩矿石不同磁性为依据,用各种磁力仪测量由它引起的磁场变化的方法,称之为磁法勘探;以岩石的导电性、导磁性、介电性为依据,用各种电法仪器测量由它们引起的电场的变化的方法,称之为电法勘探;以岩石不同弹性为依据,用地震仪测量由它引起的地震波各参数的不同的勘探方法,称之为地震勘探。

由上可见,因为地球物理勘探是通过对地球物理场进行观测和分析来说明地下地质规律的,因而它们是间接的方法。由于不同的地质体可以产生完全相同的地球物理场,因而其解是非单一的,也就是通常所说的多解性,为此就要求我们根据具体情况综合使用上述方法。

## 二、地震勘探的原理及方法

在勘探石油的各种地球物理方法中,由于地震勘探具有较高的勘探精度和分辨能力,它已成为目前最有效和最常用的方法。

“地震”就是地振动的意思。地震一般可分为天然地震(Earthquake)和人工地震(Seismic)。前者是一种能量释放的自然过程,其发生不受人类控制,称为被动地震。天

然地震资料可用于研究地壳内部结构、查明地热田等。人工地震是采用人工的办法（如炸药）激发弹性波；在测线上不同位置用地震仪器检测大地的振动，通过将这种携带了地层信息的信号进行处理并解释，从而达到可以推断和查明地下介质结构、岩性、地层埋深、构造形态（即空间位置）等勘探目的的方法即地震勘探。这种地震是人为制造的，可控制的，称为主动地震，地震勘探属于人工地震。

地震波传播所遵循的规律和几何光学极其相似。波在传播过程中，当遇到弹性分界面时，它将产生反射、折射和透射；接收其中不同的波，就构成了不同的地震勘探方法（如反射波法勘探、折射波法勘探和透射波法勘探）。本书主要讨论反射波法勘探。反射波法是在靠近震源的不同位置上，观测从震源到不同弹性分界面，再反射回地面的地震波波动，如图 0-1 所示。研究由不同反射界面反射回来的反射波，可以解决地下岩层的产状、结构，甚至于岩性等问题。一般单次激发可以得到浅到十几米，深到六千多米以内的反射波。在大多数地区利用地震勘探能够测定整个沉积剖面的地质构造，特别是圈定与石油和天然气储层有关的背斜、断层等构造。

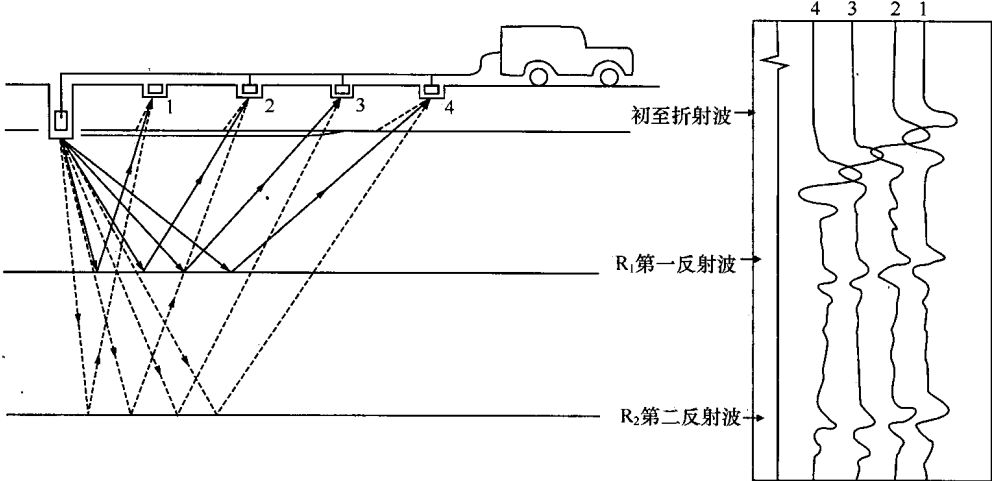


图 0-1 地震反射波法示意图

下面我们以后图 0-2 为例来简单说明反射波地震勘探确定地下弹性界面空间位置的原理。

日常生活中可观察到水波碰到堤岸就回返的现象，这就是水波的反射。如果一个人站在悬崖边适当位置上叫喊一声，可以听到自己的回声，这就是声波的反射。如果我们测得从开始叫喊到回声刚到达的时间间隔  $t_0$ ，并且知道声波在空气中的传播速度  $v$ ，利用  $L = \frac{v \cdot t_0}{2}$  即可求出这个人到反射物的距离。反射波法地震勘探正是利用这个反射测距的原理。它是在地表附近某一点人工激发地震波（例如在我国东部平原地区），最常用的办法是打一口十多米深的井，在井里放约 10 kg 炸药，利用炸药爆炸产生地震波。地震波在向地下传播过程中遇到两种地层分界面 1（例如：砂岩、泥岩两种地层的分界面），就会发生反射；再向下传播又遇到两种岩层的分界面 2（例如泥岩和石灰岩的分界面），也会发生反射（见图 0-2）。在地面上用精密的仪器（主要用地震检波器和地震仪）把来自各个

地层分界面反射波引起的地面振动情况记录下来，然后根据地震波从地面开始向下传播的时刻（即爆炸的时刻）和从地层分界面来的反射波到达地面的时刻，得出地震波从地面向下传播到达地层分界面又反射回地面的总时间  $t_0$ 。再利用别的方法测定出地震波在岩层中传播的速度  $v$ ，同样可利用  $H = \frac{1}{2}v \cdot t_0$  公式得出地层分界面的埋藏深度  $H$ 。

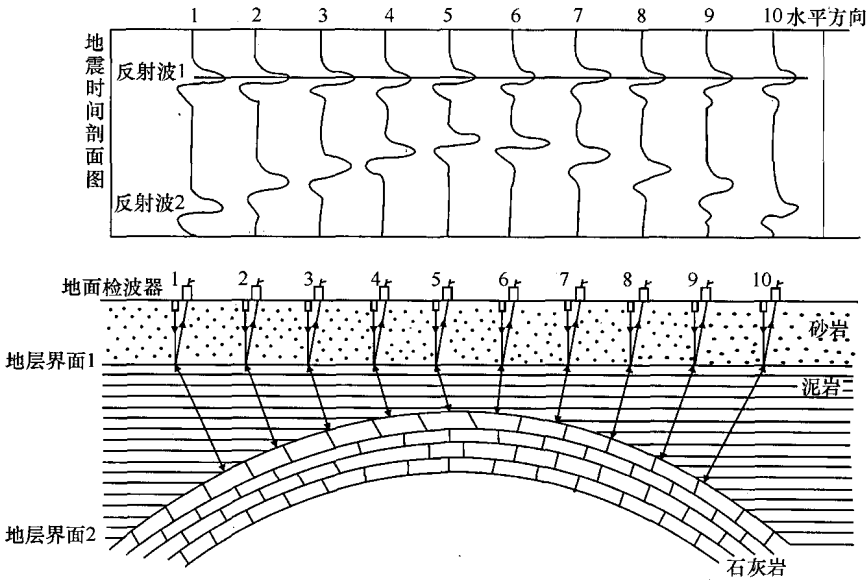


图 0-2 地震勘探原理示意图

沿着地面上一条测线，等间距设置一系列炮点 1, 2, 3, ..., 10，一段一段进行观测，并对观测结果进行处理之后，就可以得到形象地反映地下岩层分界面起伏变化的资料——地震时间剖面图（见图 0-2 上部）。图 0-2 中可以看出：地层界面 1 是水平的，因而在地面各点观测时，这个界面的反射波 1 的传播时间都相同。这些反射波波形上振幅极大值的连线（地震勘探中称为波的同相轴）就是一条水平直线，它形象地反映了界面 1 的形态。地层界面 2 是隆起的，所以来自界面 2 的反射波的传播时间在各点就不一样，在界面埋藏浅的地方，传播时间短；埋藏深的地方，传播时间长。这个反射波的同相轴就是弯曲的，与界面 2 的形态相对应。在工区内布置许多条测线，组成一个测线网，并在每条测线上都进行观测之后，就可得到地下地层起伏的完整形态；再综合其他物探方法与地质钻井等方面的资料，去伪存真，去粗取精，由表及里的分析和研究，就能查明地下可能储油的构造，确定钻探的井位。

综上所述，所谓地震勘探，就是通过人工手段激发地震波，研究地震波在地层中传播的情况，以查明地下地质构造，为寻找油气田等服务的一种物探方法。

地震勘探的生产工作，主要由三部分内容所组成。

第一阶段是野外工作。这个阶段的任务是，在地质工作和其他物探工作初步确定的有含油气希望的地区布置测线，人工激发地震波，并用野外地震仪把地震波传播的情况记录下来。这一阶段的成果是得到记录了地面振动情况的模拟或数字“磁带”。

第二阶段是室内资料处理。这个阶段的任务是根据地震波的传播理论，利用数字电子计算机，对野外获得的原始资料进行各种加工处理工作，以及计算地震波在地层内传播的速度等。这一阶段得出的成果是“地震（时间或深度的）剖面图”和地震波速度、频率、相位及其他资料。资料处理工作在配备有数字电子计算机和专用输入、输出设备的处理中心完成。

第三阶段是室内资料解释。经过计算机处理得到的地震剖面，虽然已能反映地下地质构造的一些特点，但是地下的情况是很复杂的。地震剖面上的许多现象，既可能反映地下的真实情况，也可能有某些假象；并且在地震剖面上只能看出地层的起伏形态，地层的岩性、地质时代等还是不清楚的。一条条地震剖面，只反映了地层沿剖面的起伏形态，还没有一个完整的空间概念。地震资料的解释工作就是运用地震波传播的理论和石油地质学的原理，综合地质、测井、钻井的资料，对地震剖面进行深入的分析研究，解决上述几方面的问题。其中包括对与各反射层相当的地质层位作出正确的判断，对地下地质构造的特点作出说明，并绘制反映某些主要层位完整的起伏形态的构造图，为最后查明有含油气希望的构造，提出钻探井位。

### 三、地震勘探在石油勘探中的作用

地震勘探方法与其他物探方法（电法、磁法、重力）相比，具有精度高的优点，其他物探方法都不可能像地震方法那样提供详细而较准确的由浅到深一整套地层的构造资料。地震方法与钻探相比又有成本低以及可以了解大面积的地下地质构造情况的特点。因此，地震勘探已成为石油勘探中一种最重要的勘探方法。

据统计，中国自大庆油田发现以来，90%以上的新油田都是用地震勘探方法找到的；世界上如墨西哥湾油田、中东油田、里海油田等许多大中型油田的发现也是如此。多年以来，西方世界在物探方面的投资中有90%以上用于地震勘探。目前，中国的石油物探队绝大部分是地震队，可见地震勘探方法在油气田勘探中所占的地位是相当重要的。

### 四、地震勘探的发展概况

1919年德国的Mimtrop首先使用了初至折射波法进行勘探。该方法非常简单，只记录折射波的初至时间（现在还用这种方法来测定低速带的厚度和速度）。实践证明，当地质条件复杂时这种方法容易造成解释的错误；所以反射波法逐渐代替了折射波法。

反射波地震法是Fessenden 1913年提出的，由于当时在制造仪器方面的技术困难，反射波地震法未能得到应用。直到1936年，随着工业技术的发展，反射波地震法才得到了实际应用，表现出许多优点，在石油勘探中应用得越来越普遍。尤其是近几十年，随着电子技术的发展和其他学科先进成果的采用，反射波地震勘探的方法、技术和仪器装备也得到了迅速的发展，主要表现在以下几个方面。

(1) 野外方法和技术方面，发展了非炸药震源以代替炸药震源。普遍采用组合法和多次覆盖的工作方法，覆盖次数由低覆盖次数向高覆盖次数发展。三维地震勘探、横波地震勘探、垂直地震剖面法已经开始用于解决复杂构造、深层构造、地层-岩性圈闭和直接找油找气等地质问题。目前正在研究全波地震勘探方法，它既利用波的传播方向特点，又利用质点振动方向的特点，是一种在野外同时接收纵波、横波和转换波的地震勘探方法。

(2) 在地震仪器方面, 经历了光点记录仪器、模拟磁带记录仪器, 到目前使用的数字磁带记录仪器的发展过程, 并且正向遥控遥测、高采样率、多记录道的地震仪器方向发展。

(3) 在地震资料处理方面, 早期的光点记录是不经过任何处理就直接进行解释的, 之后的模拟磁带记录只进行一些水平叠加、滤波等简单项目的处理。目前采用的数字磁带记录, 用电子计算机进行数据处理, 不仅能进行常规项目(包括动校正、静校正、速度谱、水平叠加, 叠加偏移, 滤波和反滤波等)的处理, 而且还能进行亮点剖面、声阻抗剖面、三瞬剖面(即瞬时振幅、瞬时频率和瞬时相位)等特殊项目的处理。为了适应地震数据采集量猛增的需要, 科研人员正在大力提高计算机的处理能力和扩展专用设备; 为了充分利用地震波的动力学信息, 科研人员还在发展精确求解波动方程的理论、方法和处理技术, 以达到提高分辨率和精度的目的。

(4) 在地震资料解释方面, 早期的地震资料解释工作只局限于地震构造解释, 而且完全用人工方法进行。目前的解释工作, 不仅要进行地震构造解释, 而且还要进行地震地层解释, 地震岩性解释。解释工作日趋现代化, 资料解释和资料处理工作紧密结合, 采用地震模拟技术, 进行人机联作; 综合利用地质、地震和测井资料, 在计算机上做正、反演模型与实际资料对比, 力求达到地震资料的最佳地质解释; 此外还采用计算机做构造图、等厚图和速度平面图, 解释人员通过人机联作系统进行干预。目前, 科研人员正在研究利用计算机模拟人的智能, 对地震资料进行分析研究和对比的解释方法。

地震勘探发展十分迅速, 它总体发展趋势是由构造圈闭勘探向地层-岩性圈闭勘探和直接找油找气方向发展。

## 习题与思考题

1. 地震勘探工作由哪几部分组成? 每部分的任务是什么?
2. 什么叫地震? 什么叫地震勘探? 地震勘探在石油地质勘查中能完成哪些任务?

# 第一章 地震勘探的理论基础

在这一章中我们将讨论地震勘探的一些基本原理，这些原理是地震勘探的理论基础。先介绍岩石的弹性，地震波的基本概念，然后分析地震波在岩层中的传播速度，最后介绍地震波在分界面、层状介质中、连续介质中的传播规律，以及地震波的频谱和振幅特点。

## 第一节 岩石的弹性

我们知道地震勘探是通过研究人工激发的地震波在地下岩层中传播的规律，来完成有关地质任务的方法。地震波实质上是一种机械波——机械振动在岩层中的传播过程。在普通物理课程中，已介绍过机械波是弹性波还是非弹性波与传播机械波振动的介质之性质是有密切关系的，因此要研究地震波的传播规律，首先要弄清传播地震波的介质——地下岩层的性质。

任何物体在一定条件下，都表现出一定的弹性性质。例如，我们对一块橡皮施加一个外力，它内部质点之间相对位置就要变化，结果使整个的体积或形态发生变化，这种体积大小或形状的变化，就称之为形变。如果只受到一个胀缩力（张力或压力）的作用，这块橡皮只改变其体积的大小，而仍保持原来的形状，这种形变叫体积形变（或体变）。若只受到一个旋转力或剪切力作用，它就几乎保持原来的体积大小，而只改变其形状，这种形变叫形状形变（或切变）。一般情况下，作用于物体的外力既可能有胀缩力的分量，又可能有旋转力或剪切力的分量，相应地物体形变就比较复杂，可将其看成是体变与切变的复合。若去掉外力作用后，已有形变的物体又立即恢复原来的体积和形状，则这种物体就被称作完全弹性体，它所产生的形变就称为弹性形变。物体能产生弹性形变的这种性质叫做弹性。若在去掉外力之后，物体仍旧保持已有的形变，这种物体就被称为塑性体，其形变就称为塑性形变。物体能产生塑性形变的这种性质叫做塑性。

在自然界中，大多数物体是弹性体还是塑性体？这是相对于外力的大小和作用时间的长短而言的。当外力很小而作用时间又很短时，大部分物体都是弹性体。反之，几乎所有的物体都呈现出塑性体的性质。当地震波在地下岩层中传播时，岩石呈现出什么性质呢？通常激发地震波的人工震源产生的都是瞬时激发力，在震源处这种力是很大的，传播到远离震源的介质处时，它已变得很小了。因此，在远离震源的范围內大部分岩石都可近似为完全弹性体；在震源附近，岩石不能近似为完全弹性体。在地震勘探工作中，往往只在离震源相当远的地方研究地震波，因此岩石可近似为完全弹性体。

用相同的力作用于不同的岩石，将产生不同的形变，这是因为它们具有不同的弹性性质。通常可用下述参量来描述岩石的弹性性质。

(1) 杨氏模量 ( $E$ )。简单拉伸或压缩时 [图 1-1-1 (a)], 弹性体的相对伸缩  $\Delta l/l$  与应力  $p$  之比称为杨氏模量，即有

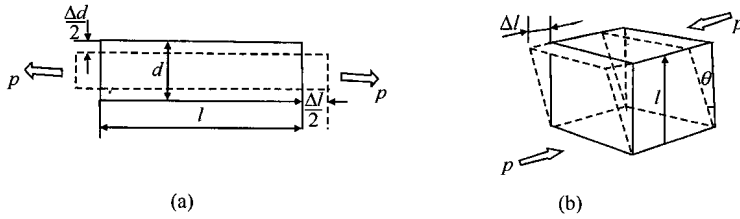


图 1-1-1 弹性体体积单元的应变与应力

$l$ —受力前棒的纵向长度或立方体边长； $\Delta l$ —受力时棒纵向长度变化值或立方体顶部变化值； $\Delta d$ —受力时横向长度变化值； $\theta$ —立方体斜棱与原来位置之间的夹角； $p$ —相邻单元作用于体积单元的应力

$$E = \frac{P}{(\Delta l/l)} \quad (1-1-1)$$

式中  $\Delta l/l$  又称为伸压应变， $p$  为单位面积上的拉伸力或压缩力。

当应力较小时，物体在线性弹性极限范围之内，不同物体的杨氏模量  $E$  为不同的常量。这时物体存在着线性的可逆的应力-应变关系。

$$\text{应力} \propto \text{应变} \quad (1-1-2)$$

式 (1-1-2) 描述的应力-应变之间的线性规律就是虎克定律，满足式 (1-1-2) 的物体称之为完全弹性体。

当应力增大，物体存在一个非线性弹性区，再增大，就超过物体的弹性极限（即超过可逆应力-应变关系的范围）。这时，对于延性材料，就存在一个具有永久变形的塑性区。当外力再增大，使应力继续变大时，就超过物体抗压强度而发生延性破坏。对于脆性材料，则应力刚刚超过弹性极限便立即发生脆性破坏见图 1-1-2。

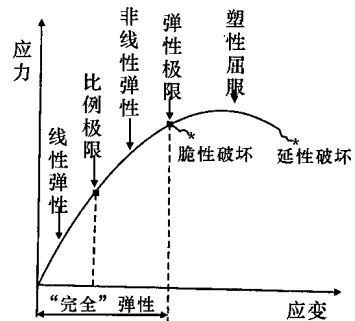


图 1-1-2 应力-应变关系图

(2) 泊松比 ( $\sigma$ )。弹性体发生纵向伸长（或缩短）时，伴随产生的横向相对收缩（或膨胀） $\Delta d/d$  与纵向相对伸（缩） $\Delta l/l$  之比值，称为泊松比，记作  $\sigma$ ，即有

$$\sigma = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} \quad (1-1-3)$$

这里的泊松比  $\sigma$  不是应力-应变比，而仅是表示形状变化特征的一种几何尺度。

(3) 体积模量 ( $K$ )。在简单静水压力作用时的应力与体应变之比值称为体积模量（又称为压缩模量）。体应变是体积的减小量  $\Delta V$  与原有体积  $V$  之比，即  $\Delta V/V$ 。

(4) 切变模量（剪切模量）( $\mu$ )。它是简单剪切力作用时的切应力  $p$  与切应变  $\tan\theta$  之比值，见图 1-1-1 (b)，即有

$$\mu = \frac{p}{\tan\theta} = \frac{p}{(\Delta l/l)} \quad (1-1-4)$$

式中  $\tan\theta = \Delta l/l$  为切应变。

(5) 拉梅常数 ( $\lambda$ )。这是为了数学上的方便而引入的一个特征值，并无简明的物理



意义。

若介质的弹性模量是一个与三度空间坐标无关的常值，则这种介质被称为各向同性均匀介质。若弹性模量是与空间坐标的一个变量有关的函数，则称这种介质为各向异性均匀介质——即所谓连续介质。若弹性模量是与空间坐标两个或三个变量有关的函数，则将这种介质称为非均匀介质。

不同埋藏深度、不同地质年代或不同岩性的岩石往往具有不同的弹性模量，这样在一个地质剖面中，就存在许多弹性分界面（即地震界面），这就是我们能够用地震勘探解决地质问题的客观前提。

## 第二节 地震波的基本概念

地震波的基本概念包括：地震波的形成、地震波的基本类型及地震波描述。

### 一、地震波的形成

目前，在我国陆地上的石油地震勘探中，一般采用炸药震源，也有的地区采用非炸药震源（如可控震源）来激发地震波。我们就以炸药震源为例来分析激发时地震波是怎样形成的？

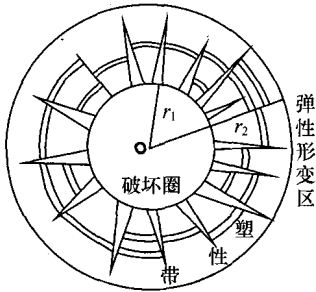


图 1-2-1 爆炸对岩石的影响图

假设地下岩石是均匀介质，它的各部分之间存在着弹性联系；当炸药在岩层中爆炸后，一般形成三个区域，如图 1-2-1 所示。

#### （一）破坏圈

当炸药在井中爆炸时，它所产生的高温高压气体对炸药周围的岩石产生了巨大的压力，由于压力大大超过了岩石的抗压强度而致使岩石被压碎，靠近炸药附近的岩石形成了一个空洞的破坏圈。

#### （二）塑性带

由于爆炸的能量有一部分在压碎岩石和发热过程中消耗掉，并随着离开震源距离的增加，炸药爆炸的能量将传给越来越多的岩石单元，因而岩石单位体积上接受的能量将迅速减小。在离开炸药一定的距离时，炸药带来的能量将小于岩石的抗压强度；此时，岩石虽不再受破坏，压力还是超过岩石的弹性限度。因此，这一带的岩石具有塑性形变的特点，在岩石中出现以震源为中心向四周扩张的辐射状的裂隙，这个地带叫塑性带。

#### （三）弹性形变区

过了塑性带以后，随着离开震源距离的增大，接受到的爆炸的能量将变得更小。在这个区域内，由于爆炸所产生的压力作用变得很小，作用时间也很短，此区域的岩石已处在弹性限度以内，可以把岩石看成是完全弹性体，这个区域称为弹性形变区。该区岩石受力后岩石质点将发生弹性形变，同时，也产生与之相对抗的应力，使这一部分岩石质点在原来的平衡位置附近产生弹性振动。由于岩石各部分之间有弹性联系，所以这一部分岩石质点的形变又要引起它周围各部分岩石的形变。例如，某一部分岩石的膨胀，就使它周围各