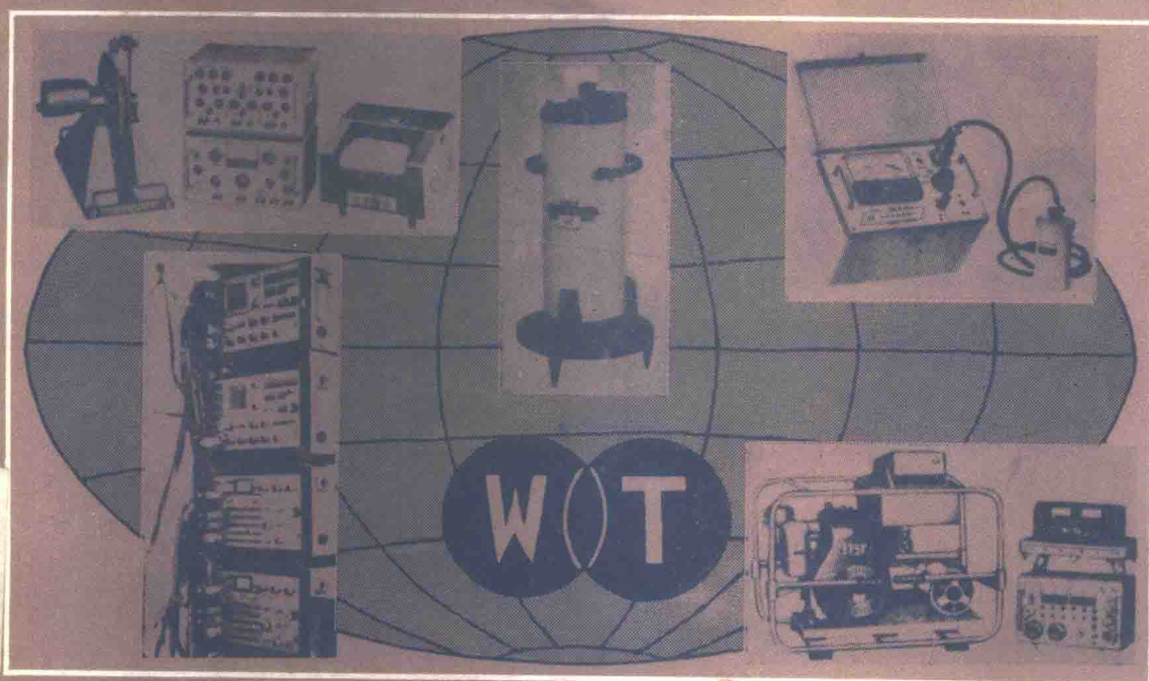


高等学校教材

普通物探教程

——地震附声波探测

丁绪荣 主编



地质出版社

高等学校教材

普通物探教程

——地震附声波探测

丁绪荣 主编

地质出版社

※ ※ ※

本书由聂勋碧主审，经地质矿产部普通物探及综合物探教材编审委员会于1982年8月成都审稿会议审定，同意作为高等学校教材出版。

※ ※ ※

高等学校教材
普通物探教程
——地震附声波探测

丁绪荣 主编

地质矿产部教材编辑室编辑

责任编辑 林清媛

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店 北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本: 787×1092²/16 印张: 13³/8 插页: 3个 字数: 299,000

1984年11月北京第一版·1984年11月北京第一次印刷

印数: 1—6,892册 定价: 2.20元

统一书号: 13038·教190

前 言

本书由地质矿产部普通物探及综合物探教材编审委员会组织编写。适于高等院校矿产地质、石油地质、水文地质和工程地质等专业学生学习物探课程的需要，也可以作为地质人员培训班的教材，以及地质工程师阅读的参考书。

过去的普通物探教材都是为适应各地质专业对物探的不同要求而编写的。虽然它们有较强的针对性，但不能较全面地反映物探方法的内容，而且各种教材之间难免出现一些重复，也花费了较多的人力和物力。因此，编写各地质专业通用的物探教材，很有必要。本书正是基于上述考虑撰写的。

本书编写时综合了高等院校地质类各专业物探教学大纲的要求，在内容上具有如下特点：（1）五大类物探方法各列一篇，内容上自成体系，故能较系统地反映该学科的现状。同时，为适应不同专业的特殊要求，也编写了一些专门章节。（2）鉴于涉及的物探方法多，基础知识广，书中着重突出了基本概念、基本原理和常用的方法，以及资料的解释和应用。在叙述中力求深入浅出，阐明物理实质，避免繁难的数学推导。（3）考虑到国内物探工作的现状及发展趋势，在保证基本知识的前提下，适当注意了内容的更新。

（4）为便于学生复习和巩固已学的知识，对重要章节给出了适量的习题和思考题。

全书共五篇，第一篇重力勘探，第二篇磁法探测，第三篇电法勘探，第四篇放射性勘探，第五篇地震勘探，附录岩体声波探测；全书分三册。作为高等院校教材使用时，教师应按照各专业物探课程教学大纲的要求选用不同的分册，并对具体内容进行取舍。矿产地质专业主要使用重力及磁力和电法及放射性两册，石油地质专业主要使用重力及磁力和地震附声波探测两册。水文地质和工程地质专业主要使用电法及放射性和地震附声波探测两册。书中带有（*）号的部分，在教学时数偏低的情况下，可不予讲授。

全书由成都地质学院丁绪荣主编。参加编写的有武汉、长春、河北、成都四所地质学院物探系及西北大学地质系的有关教师。

本册为全书的下册。编写人：第五篇：赵圣亮（第一、二、六章，第七章第四节），梁质朴（第三、五章，第七章的第一、二节），周鸿秋（第四章），吴权周（第七章第三节），附录：周鸿秋。在本册统编过程中赵圣亮同志协助主编做了大量的工作。审稿人：聂勋碧（主审）、朱光明、陈仲候、曹树棠、赵翼忱、傅唯一等同志。

编写这样的通用教材还是一种尝试。由于我们经验不足，思想水平和业务水平有限，书中疏漏错误之处在所难免，恳请使用和阅读本书的同志不吝指正。

最后，谨向为我们提供资料和给予各种方便的物探队、地质队、地质仪器厂、科研单位和兄弟院校，为本书审稿的同志、以及担任绘图、誊写工作的同志，致以衷心的感谢。

编 者

一九八三年十二月

206 401

符 号 表

A	——振幅
A^*	——视振幅
A_{Σ}	——合振幅
$A(t)$	——瞬时振幅（反射强度）道
$A(f)$	——振幅谱
$a(t)$	——子波
$b(t)$	——反子波
CDP	——共深度点
CMP	——共中心点
d	——炮点距、水平距离、直径、频谱中的谱线间隔
E	——杨氏模量
F	——作用力
f	——频率
f^*	——视频率
f_0	——中心频率
f_c	——截止频率
H	——铅直（真）深度
H^*	——视铅直深度
h	——法线深度、震源深度
h_i	——第 i 层的层厚度（下标 $i = 1, 2, 3 \dots$ 表示层号，下同）
i	——临界角
K	——体变模量、波数
K^*	——视波数
K_R, K_i	——反射系数
K_T	——透射系数
K_T'	——双程透射系数
k	——倔强系数
L	——排列长度，绕射源与炮点的水平距离
l	——长度、距离
m	——质量
O	——震源位置
O^*	——虚震源位置
P	——静压力
P_a	——射线参数

X

- r —— 波的传播距离
- r_0 —— 等效空穴半径
- $r_{xx}(\tau)$ —— 自相关函数
- $r_{xy}(\tau)$ —— 互相关函数
- $r_g(\tau)$ —— 多道相关系数
- T —— 周期、互换时间
- T^* —— 视周期
- t —— 旅行时间
- t_0 —— 回声时间、截距时间
- t_{Bz} —— 折射波时距曲线起点的纵坐标
- U —— 位移量
- V, V_p —— 速度、纵波的传播速度
- V_s —— 横波的传播速度
- V_R —— 瑞雷面波的传播速度
- V_i —— 第 i 层的层速度
- V_e —— 有效速度
- $\bar{V}$ —— 平均速度
- V_{rms} —— 均方根速度
- V_o —— 叠加速度
- V_φ —— 等效速度
- V_0 —— 连续介质的地表起始速度 ($E=0$)
- V^* —— 视速度
- V_z^* —— 上、下倾方向的视速度
- X —— 炮检距
- X_{Bz} —— 折射波时距曲线起点的横坐标
- Z —— 波阻抗、深度
- α —— 入射角, 出射角, 倾向方位角
- α' —— 反射角
- β —— 阻尼系数、吸收或衰减系数、透射角、连续介质的速度增长率
- Δ —— 采样间隔、增量符号 ($\Delta l, \Delta d, \dots$)
- ΔX —— 道间距
- Δt —— 时差, 校正量 ($\Delta t_i, \Delta t_j, \Delta t_v, \Delta t_{ij}, \dots$)
- δt —— 剩余时差
- $\delta(t)$ —— 单位脉冲函数, 狄拉克函数
- $\theta(t)$ —— 瞬时相位道
- λ —— 拉梅系数、波长
- λ^* —— 视波长
- μ —— 拉梅系数
- ν, σ —— 泊松比

ξ_i, ξ_n ——反射系数序列

ρ ——密度

τ ——延迟时间、时移量、时间

ϕ ——孔隙率

φ ——幅角、初始相位、视倾角

$\varphi(f)$ ——相位谱

ψ ——真倾角

ω ——角频率、圆频率

$\omega(t)$ ——瞬时频率道

目 录

第五篇 地震勘探

主要符号表	IX
引言	1
第一章 地震勘探的理论基础	3
第一节 弹性形变与弹性介质	3
一、应力与应变	3
二、弹性模量 (弹性系数)	3
(一) 杨氏模量和泊松比	3
(二) 体变模量和切变模量	4
(三) 拉梅系数	5
三、弹性振动	5
第二节 地震弹性波	7
一、炸药震源激发的地震弹性波	7
二、纵波、横波和面波	8
三、振动图和波剖面	10
四、视速度定理	11
第三节 地震波的频谱	12
一、傅立叶级数与离散线谱	12
*二、傅立叶级数的复数表达式	14
*三、傅立叶变换	15
四、频谱概念在地震勘探中的应用	16
第四节 地震波的传播	19
一、地震波传播的一般原理	19
(一) 惠更斯原理	19
(二) 费玛原理	19
(三) 波前扩散和波的衰减	19
二、波的反射和透射	20
(一) 水平层状介质模型	20
(二) 垂直入射时的反射和透射	20
(三) 倾斜入射时的反射和透射——反射定律和透射 (折射) 定律	21
三、折射波的形成	23
四、波的绕射和散射	25
五、地震波在水平层状介质和连续介质中的传播	26
第五节 地震勘探的地质基础	28
一、决定地震波传播速度的主要因素	28
二、地震地质条件	31
(一) 表层地震地质条件	32
(二) 深部地震地质条件	32

习题及思考题	32
第二章 地震波的时距关系	34
第一节 二层均匀介质中直达波与反射波的时距曲线	34
一、直达波的时距曲线	35
二、水平界面反射波的时距曲线	35
三、倾斜界面反射波的时距曲线	36
(一) 时距曲线及其特点	36
(二) 真倾角与视倾角	37
四、倾斜界面反射波的三维时距关系	38
五、界面弯曲对反射波时距曲线的影响	38
第二节 水平层状介质和连续介质中反射波的时距曲线	39
一、水平层状介质的平均速度和实际的时距曲线特征	39
二、用其它速度参数的代替层所得到的反射波时距曲线	41
三、连续介质中地震波的时距曲线	42
第三节 折射波的时距曲线	43
一、水平层状介质中折射波的时距曲线	43
(一) 二层介质	43
(二) 多层介质	44
二、倾斜和弯曲界面的折射波时距曲线	45
(一) 倾斜界面折射波时距曲线	45
(二) 相遇时距曲线和追逐时距曲线	47
第四节 特殊波的时距曲线	48
一、全程多次波的时距曲线	48
二、绕射波的时距曲线	50
习题及思考题	52
第三章 地震勘探仪器及野外工作方法技术	53
第一节 地震勘探仪器	53
一、地震检波器	53
二、数字磁带地震仪	54
(一) 记录系统	55
(二) 回放系统	56
三、用于浅层勘探的地震仪	57
(一) 传真式地震仪	57
(二) 信号增强型地震仪	57
第二节 野外工作方法	58
一、测线网的布置	58
(一) 普查阶段	58
(二) 面积详查阶段	59
(三) 构造细测阶段	59
二、野外观测系统及其设计	60
(一) 观测系统及其图示	60
(二) 反射波法观测系统	60

(三) 折射波法观测系统	61
三、地震波的激发	63
(一) 地震波的激发震源	63
(二) 地震波的激发条件和激发方式	63
四、地震波的接收	63
(一) 接收条件	63
(二) 组合检波	64
五、低速带测定及野外试验工作	67
(一) 低速带测定	67
(二) 试验工作	67
第三节 地震测井	68
一、野外工作方法	68
二、资料整理	68
(一) 绘制垂直时距曲线	68
(二) 计算平均速度	69
三、地震测井资料的应用	69
(一) 为绘制地震剖面提供平均速度资料	69
(二) 划分速度层并计算层速度	69
第四章 浅层地震勘探的资料整理、解释与应用	72
第一节 资料的整理	72
一、初步整理	72
二、波的对比	73
(一) 同相性	73
(二) 波形的相似性	73
(三) 振幅变化的规律性	73
三、校正	73
(一) 相位校正	74
(二) 震源深度和地形的校正	74
四、绘制时距曲线	74
第二节 有效速度的计算	75
一、利用反射波时距曲线求有效速度	75
二、利用折射波时距曲线求有效速度	76
第三节 浅层地震勘探资料的解释	76
一、折射界面的绘制	76
(一) t_0 、差数时距曲线法	79
(二) 延迟时间法	81
(三) 时间场法(波前法)	82
(四) 垂直断层位置及断距的确定	84
二、反射界面的绘制	84
(一) 交点法	84
(二) t_0 法	84
三、地震剖面图和构造图的绘制	84

(一) 地震剖面图的绘制	84
(二) 地震构造图的绘制	85
第四节 浅层地震勘探的应用	86
一、测定覆盖层厚度和基岩面高程	86
二、查明地下构造	87
三、追索古河床和确定含水层层位	88
四、测定岩土弹性力学参数	89
(一) 弹性力学参数与波速的关系	89
(二) 纵、横波的激发与接收	89
(三) 动、静弹模的关系	90
习题及思考题	91
第五章 共反射点水平叠加技术	92
第一节 水平叠加的原理	92
一、水平界面共反射点时距曲线	93
二、倾斜界面的共中心点道集时距曲线	93
三、动校正和静校正	94
(一) 动校正与剩余时差	95
(二) 静校正	96
第二节 水平叠加观测系统	97
一、水平叠加观测系统图	97
二、观测系统设计时的参数选择	99
第三节 特殊波和干扰波的叠加效应	100
一、断面波与绕射波的叠加效应	100
(一) 断面波	100
(二) 绕射波	101
二、水平叠加对干扰波的压制作用	101
(一) 规则干扰波	103
(二) 无规则干扰波	104
第六章 地震资料的数字处理	104
第一节 地震资料处理概述	104
一、地震记录中的有用信息	104
二、地震资料数字处理设备	104
三、地震资料数字处理项目与流程概述	106
(一) 输入	106
(二) 预处理	106
(三) 信息改善与处理	107
(四) 信息提取与分析	107
(五) 人工合成记录与理论模型	107
第二节 地震资料的常规处理	107
一、校正处理	108
(一) 初步静校正	108
(二) 剩余静校正	108

(三) 动校正	108
二、振幅处理	110
(一) 校零偏处理	111
(二) 均衡处理	111
(三) 整幅处理	111
三、叠加处理	112
(一) 水平叠加与自适应加权叠加	112
(二) 偏移叠加与叠加偏移	114
第三节 数字滤波概述	115
一、滤波器的脉冲响应与频率响应	116
二、褶积运算	118
三、褶积滤波因子	120
(一) 理想低通滤波因子	120
(二) 理想带通滤波因子	121
(三) 实用的滤波因子	121
四、反滤波	123
第四节 相关分析与速度分析	125
一、相关系数与相关函数	126
二、自相关、互相关与多道相关	127
三、相关分析的应用	129
四、速度谱的制作及应用	131
(一) 速度谱的制作原理和方法	131
(二) 速度谱的应用	133
第五节 其它常用处理项目简介	135
一、人工合成记录与理论地震模型	135
(一) 地震道的形成机制与合成地震记录	135
(二) 人工合成的地震记录和地震剖面	136
二、拟声速测井曲线	138
三、振幅保持剖面	140
四、“三瞬”剖面	142
习题及思考题	144
第七章 反射波法地震资料的解释与应用	145
第一节 时间剖面的解释	145
一、时间剖面	145
(一) 时间剖面的显示	145
(二) 时间剖面的特点	146
二、时间剖面中波的对比	147
(一) 波的对比标志	147
(二) 实际的对比方法	148
(三) 时间剖面对比解释实例	149
三、断层及不整合等特殊地质现象在时间剖面中的表现及其对比与解释	150
(一) 断层	150

(二) 超覆、退覆及地层不整合	152
四、时间剖面中常见的一些假象——时间剖面对比时应当注意的一些问题	153
(一) 由速度变化所引起的假象	153
(二) 由几何因素造成的假象——偏移现象	154
第二节 地震成果图件的编制与解释	155
一、深度剖面的绘制	155
(一) 均匀介质条件下绘制深度剖面的 t_0 法	156
(二) 连续介质中绘制深度剖面的 t_0 法	156
二、地震构造图的绘制	158
(一) 地震构造图的种类	158
(二) 空间校正量板的制作	158
(三) 进行空间校正、绘制真深度构造图	160
三、等厚度的编绘	161
第三节 地震地层解释的基本方法	162
一、地震层序分析	162
(一) 地震层序的概念	162
(二) 地震层序的划分	162
二、沉积过程中水平面相对变化分析	166
(一) 水平面相对变化的标志	166
(二) 水平面相对变化曲线的制作和应用	167
三、地震相分析	168
(一) 地震相的概念	169
(二) 地震地层参数的地质意义	169
(三) 地震相平面图的制作	174
四、地震相的地质解释	176
(一) 沉积环境与地震相间的关系	176
(二) 地震相的地质解释方法	176
(三) 地震相地质解释实例分析	177
第四节 地震资料的岩性解释	178
一、特殊处理的地震成果图件的解释和应用	178
(一) 振幅保持剖面与瞬时振幅剖面	178
(二) 视极性剖面	179
(三) 瞬时相位剖面	179
(四) 瞬时频率剖面	179
(五) 声阻抗剖面	179
二、碳氢检测 (HCI) 技术简介	180
(一) 碳氢检测的方法原理和成果图件	180
(二) 碳氢检测的效果分析	182
附录 岩体声波探测	183
第一节 岩体声波探测概述	183
第二节 声波仪的基本原理	184
一、声波仪的主要部件及其功用	184

二、电声换能器的工作原理	184
第三节 岩体声波探测的工作方法	185
一、基本方法	185
二、初至的识读和横波的测定方法	185
第四节 声波探测在工程地质中的应用	186
一、岩体力学参数的测定	187
二、岩体的工程地质分类	189
三、围岩应力、应变的测定	191
四、矿柱塌陷等地压灾害的监测	192
第五节 声波测井	193
一、声速测井	193
二、声幅测井	196
三、超声电视测井	196
习题及思考题	198
主要参考书刊	199

引 言

自古迄今，地震不断给人类带来灾害。因此，人们早就注意观测研究这种自然现象。我国就是最早使用仪器观测地震，并系统地记录震情资料的国家之一。

一次大地震释放出来的巨额能量，其中一小部分造成震中附近介质不同程度的破坏，而大部分则以地震弹性波的形式，在整个地球内传播，离震中越远处观测记录下来的地震波，就包含着地球越深处的物理性质的信息。对大量地震观测资料分析研究的结果，确立了地球的层状构造模型。按地震波传播速度的变化特征，可将地球分为地核、地幔和地壳三部分，并可进一步划分为若干亚层。例如，地壳就可以细分为沉积岩层，花岗岩层和玄武岩层，而以莫霍洛维奇面为其底界。

第一次世界大战期间，研究地震学的观测技术开始用于军事侦察和地质勘探方面。例如，试图用声波的反射时间来探测海底深度或冰山距离；利用测定震中位置的原理来确定敌方重武器阵地的位置等等。在地质勘探方面，则试图利用人工激发的地震波在不同地层中的传播方式和传播速度等特征，借以探测地质构造，因而建立了地震勘探法。过去积累起来的地震学研究成果，为地震勘探技术的形成和发展奠定了坚实的基础。

在两次世界大战之间的二十年中，地震勘探技术发展迅速，已成为地球物理勘探学科中一个独立的分支。采用电子放大和光点示波等技术，造出了可以同时记录若干检波点微弱地震信号的第一代多道地震仪；用折射波法探明了一批盐丘构造；用反射波法找到不少潜伏储油构造；解决了一些大地构造和水文工程地质方面的问题。图 5.0.1 便是反射波法地震勘探与野外地震记录的示意图。

与重力、磁法、电法等物探方法不同，地震勘探是根据地震波在地下传播过程中，遇到地震界面后所产生的反射波或折射波，返回地面的旅行时间来确定界面的埋藏深度和产

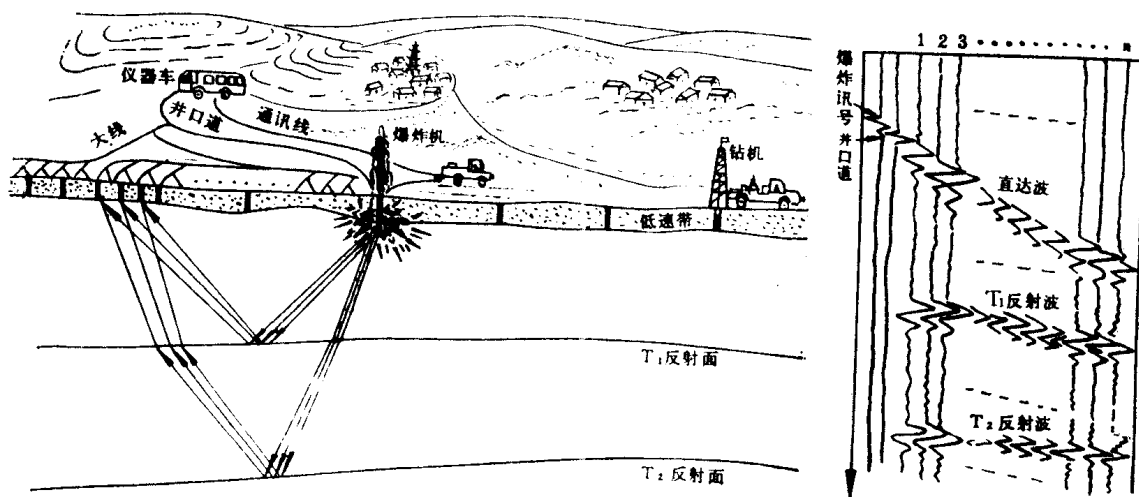


图 5.0.1 反射波法地震勘探及地震记录示意图

状,其成果图件准确、可靠。此外,根据所观测的地震波在介质中传播速度及波的振幅与波形变化,还可以探讨介质的物性与岩性。因此,地震勘探很快就发展成为石油勘探中占绝对优势的,在煤田勘探和水文工程地质调查中十分重要的物探方法。现在,几乎所有开发石油资源的国家,都将90%以上的物探经费和人力用于地震勘探方面。

本世纪五十年代以来,由于不断采用飞速发展的电子工业和计算机科学的最新成就,地震勘探技术也迅速发展,经历了模拟磁带化和数字化两次重大的技术换代。当前,能源勘探工作中的地震勘探已普遍实现了数字化。在野外,用多至成百上千道的地震仪器进行数据采集工作,在室内用大、中型电子计算机系统进行资料处理,并能自动输出各种成果图件。不但能迅速查明复杂油气田和煤田的地质构造,而且在研究岩性,岩相问题和直接寻找与评价油气资源方面,也开始取得重要进展。

随着电子器件集成度与技术性能的提高,地震勘探仪器的性能,如灵敏度、动态范围、可靠性、仪器道数等等,也得到相应的提高,而仪器的重量和体积却大为减小。从而对地震勘探技术的推广和应用非常有利。例如,安全可靠而又灵巧的专用地震仪器,可用在矿井中探测煤层的连通性并测定断层位置。各种轻便的水文工程地震仪器,不但能在各种复杂的地表条件下迅速测定基岩的埋藏深度,还可能提供很宝贵的基岩弹性模量的资料。

为了说明地震勘探工作的效果和技术发展水平,展出一幅北海某地的三维地震成果图,见图(5.6.52)。图中只显示出纵、横两个地震剖面,但从中可以清楚地看出地层的产状和它们之间的不整合接触关系,并能看出断层和断面的产状。根据这类三维地震的成果资料,可以按解释工作的需要,显示测区内任意位置、任意方向的地震剖面 and 水平方向的切面。经过进一步的数字处理,提取有用的地震信息,还可以在地震剖面中用色彩来显示地震波在地层中传播过程中速度、振幅、频率等方面的变化,以便进行岩性研究。由此可见地震勘探在解决地质构造问题和油气勘探方面,能够发挥十分重要的作用。

今后,随着科学技术的不断进步,地震勘探技术水平将继续提高。随着它解决各种复杂地质问题的成效日益显,著它的应用范围也势必日益广泛。

第一章 地震勘探的理论基础

第一节 弹性形变与弹性介质

地震勘探观测研究的介质和对象是岩层。就对地质年代、沉积条件和物质成份相同的某一特定的岩层来说，一般情况下，假设其物理性质，特别是沿不同方向测定的物理性质均相同。这样的岩层便可看作是一层各向同性的均匀介质。对于这种理想化的模型，任何物性测定都与在介质中的位置及测定方向无关。换句话说，在各向同性均匀介质中的任意部位，沿任意方向采取一个样品进行物性测定的结果，均可以代表该介质的物理性质。本篇中所论述的岩层，如无特殊说明，均认为是这种理想化的介质。

一、应力与应变

现将一个各向同性的均匀介质圆柱体样品进行拉伸试验，借以说明应力与应变以及介质的弹性性质等基本概念。

如图5.1.1(a)所示，圆柱状样品长度为 l ，直径为 d ，截面积为 S 。该柱体在一个不太大的外力 F 拉伸下发生形变，长度变为 $l' = l + \Delta l$ ，直径变为 $d' = d + \Delta d$ （在拉伸形变时 Δd 本身为负值）。同时，柱体内部分子之间会产生内聚力以维持平衡。显然，柱体内每个横截面上的内聚力应和外力 F 相等，但方向相反。若增加拉力 F ，则形变程度和样品内聚力会相应地增加。若将 F 逐渐减小到零，该柱状样品也能逐渐恢复到原来的形状和体积这样的形变称为弹性形变；组成该样品的物质称为弹性介质。

在弹性理论中，将单位长度所产生的形变 $\Delta l/l$ ，称为应变；将单位横截面所产生的内聚力 F/S 称为应力。在上述柱状样品的拉伸试验中，应力与应变的关系曲线见图5.1.1(b)。曲线在第一象限的部份表示拉伸，在第三象限的部份表示挤压。曲线的这两部份一般并不完全对称。

二、弹性模量（弹性系数）

（一）杨氏模量和泊松比

图5.1.1(b)中的 $P'P$ 段近似为一段直线。这表明，当外力不大应变在 $-X_1$ 到 X_1 区间之内时，应力与应变成正比关系，遵从胡克定律。该区间称为线性弹性形变区或完全弹性形变区。这时，应力与应变的比值称为杨氏模量（拉伸模量），以符号 E 表示。

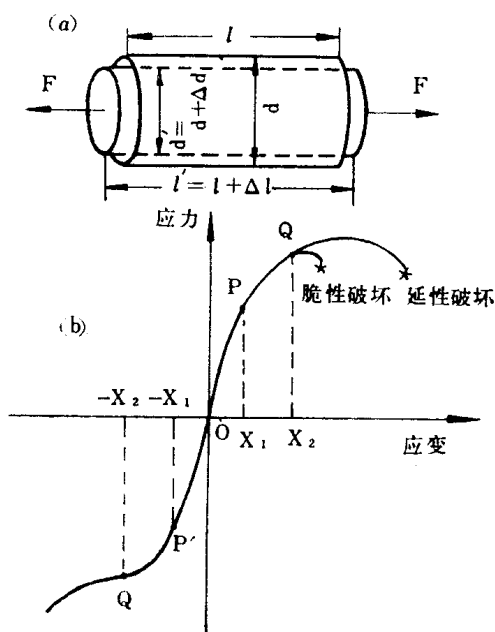


图 5.1.1 柱状样品拉伸试验中的应力与应变