

## 目 录

绪 论 .....	(1)
第一节 地震勘探方法简介 .....	(1)
一、反射波法 .....	(2)
二、折射波法 .....	(2)
三、透射波法 .....	(2)
第二节 地震勘探的发展 .....	(3)
一、地震勘探发展简史 .....	(3)
二、我国地震勘探发展简史 .....	(5)
第一章 地震勘探的理论基础 .....	(9)
第一节 弹性理论概述 .....	(9)
一、弹性介质与粘弹性介质 .....	(9)
二、应力与应变 .....	(10)
三、应力与应变的关系 .....	(13)
四、波动方程 .....	(15)
第二节 地震波的基本类型 .....	(19)
一、地震波动的形成 .....	(19)
二、纵、横波的形成及其特点 .....	(19)
三、面波 .....	(21)
第三节 地震波场的基本知识 .....	(22)
一、运动学的基本知识 .....	(22)
二、动力学的基本知识 .....	(26)
第四节 地震波的传播 .....	(30)
一、地震波的反射和透射 .....	(30)
二、折射波的形成 .....	(31)
三、绕射波 .....	(32)
四、在弹性分界面上波的转换和能量分配 .....	(33)
五、地震波的衰减 .....	(39)
六、地震波的频谱 .....	(42)
第五节 地震勘探的分辨率 .....	(44)
一、纵向分辨率 .....	(45)
二、横向分辨率 .....	(48)
三、影响分辨率的主要因素 .....	(49)

习题一 .....	(51)
<b>第二章 地震勘探的地质基础</b> .....	(53)
第一节 影响地震波传播速度的地质因素 .....	(53)
一、岩性 .....	(53)
二、密度 .....	(54)
三、孔隙度 .....	(54)
四、孔隙充填物 .....	(55)
五、风化程度 .....	(55)
六、其他因素 .....	(56)
第二节 地震介质的划分 .....	(56)
一、各向同性介质与各向异性介质 .....	(56)
二、均匀介质、层状介质与连续介质 .....	(57)
三、单相介质与双相介质 .....	(58)
第三节 地震地质特征 .....	(58)
一、工程地震地质特征 .....	(58)
二、能源地震地质特征 .....	(60)
三、金属矿地震地质特征 .....	(61)
第四节 地震地质条件 .....	(62)
一、表层地震地质条件 .....	(62)
二、深部地震地质条件 .....	(64)
习题二 .....	(65)
<b>第三章 地震波的时距关系</b> .....	(66)
第一节 直达波及折射波时距曲线 .....	(67)
一、直达波时距曲线 .....	(67)
二、水平层状介质中折射波时距曲线 .....	(67)
三、隐伏层中的折射波 .....	(70)
四、倾斜界面折射波时距曲线 .....	(71)
五、弯曲界面折射波时距曲线 .....	(73)
六、垂直构造的折射波时距曲线 .....	(73)
第二节 反射波时距曲线 .....	(75)
一、水平界面的反射波时距曲线和正常时差 .....	(75)
二、倾斜界面的反射波时距曲线 .....	(77)
三、水平多层介质的反射波时距曲线 .....	(79)
四、复杂情况下的反射波时距曲线 .....	(82)
第三节 连续介质中的地震波 .....	(84)
一、连续介质中波的曲射线方程 .....	(84)
二、连续介质中的“直达波”(回折波) .....	(85)

三、连续介质中的反射波和折射波 .....	(86)
第四节 特殊波时距曲线 .....	(87)
一、全程多次反射波的时距曲线 .....	(87)
二、绕射波时距曲线 .....	(88)
第五节 $\tau-p$ 域内各种波的运动学特点 .....	(90)
习题三 .....	(91)
<b>第四章 地震资料的野外采集 .....</b>	<b>(94)</b>
第一节 地震勘探野外采集系统 .....	(94)
一、几个基本概念 .....	(94)
二、地震勘探对仪器的要求 .....	(96)
三、地震仪的主要组成部分 .....	(97)
四、数字地震仪的工作原理 .....	(103)
第二节 地震测线的布置 .....	(104)
一、测线布置的基本要求 .....	(105)
二、测线布置形式 .....	(107)
第三节 地震勘探观测系统 .....	(108)
一、观测系统的概念 .....	(108)
二、观测系统的图示方法 .....	(109)
三、二维反射波法观测系统 .....	(110)
四、三维反射波法观测系统 .....	(112)
五、折射波法观测系统 .....	(114)
第四节 地震波的激发和接收 .....	(115)
一、地震波的激发 .....	(115)
二、地震波的接收 .....	(121)
第五节 地震波速度的测定 .....	(126)
一、地震测井 .....	(126)
二、声波测井 .....	(129)
三、PS 测井 .....	(131)
第六节 海上地震勘探 .....	(133)
一、海上地震特殊干扰波 .....	(134)
二、海上震源 .....	(136)
三、海上定位 .....	(139)
四、海上地震数据采集方法 .....	(143)
习题四 .....	(146)
<b>第五章 抗干扰技术 .....</b>	<b>(148)</b>
第一节 有效波和干扰波 .....	(148)
一、震源干扰波 .....	(148)

二、外界干扰波·····	(151)
第二节 地震组合法·····	(152)
一、组合检波基本原理·····	(153)
二、组合的滤波特性·····	(154)
三、组合对随机干扰的统计效应·····	(156)
四、组合参数的选择·····	(159)
第三节 多次覆盖法·····	(160)
一、共反射点叠加原理·····	(160)
二、多次覆盖观测系统·····	(161)
三、共反射点多次波的剩余时差·····	(163)
四、共反射点多次叠加效应·····	(164)
五、影响共反射点叠加效果的因素·····	(168)
六、多次覆盖技术叠加参数的选择·····	(171)
第四节 其他抗干扰技术·····	(173)
一、垂直叠加·····	(173)
二、频率滤波·····	(174)
三、最佳窗口接收·····	(174)
四、最佳偏移距接收—地震映像技术·····	(176)
第五节 抗干扰与分辨率的关系·····	(177)
一、抗干扰与分辨率·····	(177)
二、振幅分辨率与时间分辨率·····	(177)
习题五·····	(178)
<b>第六章 反射波地震数据处理·····</b>	<b>(180)</b>
第一节 预处理·····	(180)
一、解编和剪辑处理·····	(180)
二、切除·····	(180)
三、抽道选排·····	(182)
四、真振幅恢复·····	(182)
第二节 数字滤波处理·····	(183)
一、滤波器的基本概念·····	(183)
二、一维频率滤波·····	(186)
三、二维视速度滤波·····	(191)
第三节 反滤波处理·····	(196)
一、反射波地震记录的形成·····	(196)
二、反滤波的基本概念·····	(198)
三、地震子波的提取·····	(199)
四、最小平方反滤波·····	(202)
五、预测反滤波·····	(206)

第四节 速度分析处理 .....	(211)
一、速度分析原理 .....	(211)
二、速度谱 .....	(217)
三、速度扫描 .....	(222)
四、速度分析精度的影响因素 .....	(222)
五、层速度的计算 .....	(224)
第五节 校正和叠加处理 .....	(225)
一、静校正 .....	(226)
二、动校正 .....	(230)
三、水平叠加 .....	(232)
第六节 偏移处理 .....	(233)
一、偏移的基本概念 .....	(234)
二、克希霍夫偏移 .....	(242)
三、波动方程偏移 .....	(244)
习题六 .....	(249)
<b>第七章 地震资料解释 .....</b>	<b>(251)</b>
第一节 地震反射波资料的构造解释 .....	(251)
一、时间剖面与地质剖面的差别 .....	(251)
二、时间剖面的对比 .....	(252)
三、地震波场分析 .....	(254)
四、地震反射层位的地质解释 .....	(259)
五、地震反射断层的地质解释 .....	(261)
六、特殊地质现象解释 .....	(263)
七、深度剖面、构造图、等厚图的绘制 .....	(263)
第二节 地震反射信息的地震地层解释 .....	(265)
一、地震层序划分 .....	(266)
二、地震相分析 .....	(269)
三、地震相的地质解释 .....	(274)
第三节 地震折射波资料的解释 .....	(275)
一、折射波记录的对比 .....	(276)
二、折射波时距曲线的绘制 .....	(277)
三、折射界面的构制 .....	(278)
四、 $t_0$ 差数时距曲线法的自动化解释 .....	(285)
五、特殊问题 .....	(288)
习题七 .....	(290)
<b>第八章 其他地震勘探方法与技术 .....</b>	<b>(291)</b>
第一节 金属矿地震勘探 .....	(291)

一、散射波地震勘探的基本原理·····	(291)
二、散射地震波的分类及基本特征·····	(292)
三、金属矿地震勘探数值模拟研究·····	(294)
四、散射波成像原理及地震采集技术·····	(298)
五、硬岩环境下的地震数据采集技术·····	(301)
第二节 垂直地震剖面(VSP)法·····	(303)
一、VSP基本原理·····	(304)
二、VSP资料的采集·····	(307)
三、VSP资料的处理和解释·····	(308)
四、VSP资料的应用·····	(311)
第三节 地震层析技术·····	(314)
一、层析技术概述·····	(314)
二、层析成像的基本理论(拉冬变换)·····	(314)
三、地震波井间层析成像原理·····	(316)
四、反演计算与图像生成·····	(317)
五、地震层析技术在工程勘察中的应用·····	(319)
第四节 瑞雷波勘探·····	(320)
一、瑞雷波的波场特征·····	(321)
二、瑞雷波法勘探原理·····	(325)
三、瑞雷波传播速度的计算·····	(326)
四、瑞雷波勘探的资料解释·····	(328)
五、瑞雷波勘探在工程勘察中的应用·····	(331)
第五节 微动观测·····	(336)
一、微动的概念·····	(336)
二、常时微动的性质·····	(336)
三、常时微动测量方法·····	(338)
四、常时微动的资料处理和解释·····	(338)
五、常时微动在工程中的应用·····	(340)
第六节 声波探测·····	(342)
一、声波探测概述·····	(342)
二、声波探测原理及工作方法·····	(342)
三、声波探测在工程地质中的应用·····	(343)
习题八·····	(346)
参考文献·····	(348)

## 绪论

### 第一节 地震勘探方法简介

地球物理勘探方法都是以研究岩石的某种物理性质为基础的,地震勘探是其中重要的一种,它所依据的是岩石的弹性。地震勘探学由天然地震学发展而来,当发生地震时,地壳会产生断裂,裂缝两边的岩石会产生相对移动,正是这种破裂产生了由断裂面向外传播的地震波。地震勘探属于人工地震,所采用的震源可以控制,可以移动,其基本工作方法是采用炸药或非炸药震源,在地表某测线上或浅井中激发地震波,当地震波向下传播遇到弹性不同的分界面时,就会发生反射、透射和折射,我们可沿测线的不同位置安置检波器并用专门的地震勘探仪器记录这些地震波。由于地震波在介质中传播时,其传播路径、振动强度及波形将随所通过介质的结构和弹性性质的不同而变化,如果掌握了这些变化规律,根据所接收到的地震波旅行时间与速度资料,就可推断解释地层结构和地质构造的形态,而根据波的振幅、频率、速度等参数,则有可能推断地层或岩石的性质,从而达到地震勘探的目的。

从投资费用以及解决地质问题的广泛程度来说,地震勘探无疑是最重要的一种地球物理勘探方法。和其他地球物理方法相比,地震勘探的重要特点或者说优势是准确性好、分辨率高、探测深度大。地震勘探最突出的成就是寻找能源,世界各地的各大油气田和煤田绝大多数是由地震勘探发现的,目前普遍采用能提供丰富细节信息的三维地震技术,极大地发挥了油藏工程和煤田勘查的能力。此外,地震勘探还常被用于解决诸如工程地质填图、建筑、水利、电力、核电站、铁路、公路、桥梁、港口、机场等各种工程地质问题。遗憾的是,由于地震技术不能很好地区分多种类型岩石分布复杂情况时的界面,过去它很少直接用于金属矿勘探。目前,我国的地质找矿难度日益增大,在寻找盲矿和深部隐伏矿为中心的勘探,地震勘探方法再次引起人们的重视。事实上,金属矿往往都是构造控矿,可利用地震和测井方法对地下复杂的地质构造进行成像,这方面已有取得成功的应用实例;另外,对金属矿易产生散射的特点,强调研究基于地震波散射理论的散射波地震技术是金属矿地震勘探技术的发展方向。

在地震勘探中,根据地震波的类型不同可分为纵波、横波和面波地震勘探,根据地震波传播特点的不同可分为反射波法、折射波法和透射波法地震勘探,根据地震勘探的目的和任务可以分为工程(浅层)、煤田、石油、金属矿地震勘探以及地震测深等。此外,还可根据探测对象和应用目的不同,分为浅层地震勘探和中、深层地震勘探。研究大地构造与深部地质问题的称为地震测深;寻找石油、天然气的叫石油地震;探测煤层和煤田构造的叫煤田地震,这些地震勘探一般探测深度都比较大,达数百米至数千米,故称之为中、深层地震勘探。浅层地震勘探主要研究地表数百米范围内的地层和地质构造,主要用于各种工程、水文、环境等地质勘探。

## 一、反射波法

反射波法研究的是地震波在不同弹性介质分界面上按一定规律产生反射的原理。在日常生活中,经常遇到波的反射现象,如人在山谷中的呼喊会产生回声,这是因为声波在空气中传播时遇到障碍物——山而反射回来的结果。声波在空气中的传播速度约为 340 m/s,如果记录下声波反射来回的时间,就可以大致计算出障碍物与呼喊者之间的距离。

反射波法地震勘探原理与这种声波反射的情况非常相似,但其反射过程要复杂得多,因为弹性波在地下介质中的传播速度受其成分的影响而在很大范围内变化,且往往为未知,因此利用反射波测量反射界面的深度也要复杂得多。换言之,从地震波所携带的信息中还可以了解波传播路径中所遇到的岩石性质。为了更好地研究反射界面的深度、形态以及地下介质的岩性,一般要同时记录地震波从一个震源到达若干观测点上引起的大地振动,这需要使用专门的地震勘探仪器来完成这一工作。根据地震波场理论,地震反射纵波的能量主要集中在接近震源的地方,而在靠近震源处,地震反射纵波的运动学特征变化规律也比较简单。因此,纵波反射波法勘探通常在距离震源较近的若干测点上布设检波器,分析各检波器上接收到的反射波旅行时,结合地震波的传播速度,就可以确定发生反射的界面的位置和起伏形态;而反射纵波的速度、波形、频率、吸收等动力学特征参数,可作为推断地层特征、岩性性质或其他矿物存在与否的标志。

反射波法勘探深度可以从最浅的几米到几千米,甚至上万里,只要存在弹性分界面和足够能量的震源,就必然会出现反射波,因此其应用范围最为广泛。无论是寻找石油、煤炭等能源资源,还是解决工程地质问题及矿产资源勘探开发问题,以及大地构造与深部地质问题都可以使用反射波法。

## 二、折射波法

折射波法是研究地震波在速度分界面(波在这个界面以下地层中的传播速度大于波在其上面地层中的传播速度)产生滑行波引起的振动。当地震波射线以临界角入射时,射线在速度分界面上会发生全反射,即透射角为  $90^\circ$ ,射线以下伏岩层的速度沿界面滑行,由于上、下介质的弹性联系,进而引起上覆岩层介质中的质点发生振动,并以与入射时临界角相等的角度返回地面,这种波称为折射波,由于这种波首先被地震仪接收到,所以也叫首波。通过研究在地表接收到的折射波的传播时间和距离的关系,可以求得地下介质速度及界面埋深等参数。由于折射波需要以临界角入射,仅当下伏岩层比上覆岩层的地震波速大时才会产生,并且折射波法得不到反射波法那样高精度的构造图,折射波法的应用比反射波法要少得多,它主要用于工程地震勘探中探查基岩的埋深,并利用地震波速度进行工程地质围岩分类及评价岩体质量等。

## 三、透射波法

透射波法和反射波法、折射波法不同,它是观测和研究通过某种岩层的直达穿透波。这种波与光学中的折射波相同。工作时,振动的激发点和接收点分别位于地下弹性分界面或地质体的两侧。此法多数情况下是在钻孔或坑道中进行,根据地震波的传播时间以及激发点与接收点之间的距离,可以求得波在该层中的传播速度进而确定地质异常体的形态,并可计算



出岩层或地质体的弹性模量等力学参数。目前实际工作中开展的透射波法主要是跨孔法和垂直地震剖面(VSP)法,前者激发点和接收点均在井中,使用得较少;后者是常规速度测井的扩展,在井与地面之间激发和接收,使用较为广泛。

## 第二节 地震勘探的发展

### 一、地震勘探发展简史

地震勘探学是天然地震学的产物,由天然地震学发展而来。我国是世界上地震学发展最早的国家。公元132年,东汉时期杰出的自然科学家张衡就设计成功了世界上第一台观测地震的仪器——候风地动仪。当时在洛阳已经能记录到远在千里之外(甘肃)的地震,还能够测定发生地震的方向。

直到19世纪初,随着西方国家的大工业以及数学、力学和弹性力学的发展,科学家才从理论上证明了纵、横波的存在。在第一次世界大战期间(1914—1918年),德国和同盟国双方都做过试验,根据重炮发射时因反冲而产生的地震波,利用三个或更多的机械式地震仪来定位对方的炮兵阵地。第一次世界大战结束后,经济恢复对石油的需求迅速增长,而用地质方法寻找石油的收益开始下降,地震方法便应运而生了。

1919年德国人 Mintrop L 申请了折射波法专利,并在1920年至1921年利用折射波法研究了德国北部两个著名的盐丘以及后来发现的 Meissendorf 盐丘。与此同时,他成立了一个地震公司(Seismos)进行地球物理勘探,使用的地震折射波法是初至折射波法,利用机械地震仪,采用剖面法进行观测,研究并促进了折射波法地震勘探的发展。1922年,Seismos公司在瑞典试验用于矿业勘探,在荷兰试验用于煤田勘探,成功地探测了煤层深度。1926年前后,Seismos公司使用折射波法进行石油勘探,一系列的钻探成功,引发了地震折射波法的大规模应用,并促使了石油勘探的革命。

实际上,在 Mintrop L 的折射波法兴起和迅速发展的同时,反射波法亦在萌发之中。1919年,Karcher 和 McCollum 申请了3项有关地震反射波法的专利。1920年,他们组建了地质工程公司(Geological Engineering Company),应用地震反射波法来寻找油气。

1920年6月,英国皇家学会会员 Evans J W 和 Whiteley W B 在英国申请了“地球内部构造研究方法的改进”专利,这份专利明确提出了地震反射波勘探方法。

1920年前后,Karcher 和 Haseman 进行了一系列的反射波法试验性勘测,他们使用一台示波器改装成3道的地震仪,并用无线电话接收器做成了电动式检波器。他们在一已知的背斜上做了一个地震反射法剖面,获得了一些清晰的反射波记录,并作出了背斜顶部构造的剖面图。

从1922年到1927年,由于石油价格下跌,地震反射波法勘探的发展受到了影响,在断断续续进行的反射波法试验中,不同地区所做的反射波法地震记录质量也非常不稳定。实际上,在1928年以前,由于检波器和地震记录仪器的性能不佳,加上野外工作方法不适当,这一时期的反射波法一直是试验性的。

1927年,美国科罗拉多矿业学院首次开设了地球物理勘探课程,也是在这一年进行了第一次地震测井。

1929年, GRC的一个地震队在 Louisiana 的海湾地区对已知 Darrow 盐丘进行详查, 这个队用“测定倾角观测系统”进行反射波法勘探, 根据反射波作出了构造图, 所钻的第一口井见到了工业油流, 从而发现了 Darrow 油田, 接着又陆续钻了一些油井。这些井表明, 反射波法作出的构造图比折射波法作出的构造图精度高, 从而开始显示出反射波法的优点。反射波法也很快成为石油勘探中占主导地位的勘探方法。

值得指出的是, 1930年, 前苏联学者甘布尔采夫把反射波技术应用于折射波法中, 创造了折射波对比法, 不仅记录初至, 还可对比追踪中深层界面产生的续至折射波, 提高了解释精度, 加深了勘探范围, 扩大了折射波法的应用范围, 使之能在很多领域发挥作用。然而, 由于地震折射波法的固有缺点, 如折射波法会漏掉大部分地层界面, 在地质条件相对复杂时容易造成解释中的错误, 地面观测折射波必须在盲区以外等, 这些使折射波法具有很大的局限性, 因此它在石油勘探中逐渐失去了优势, 逐渐让位于反射波法。但是, 由于折射波法具有能直接计算出界面以下的地层速度等优点, 直到今天地震折射波法在低速带测量及地壳测深等方面仍然是不可缺少的方法, 尤其是在工程地质勘察中发挥了重要作用。

20世纪30~40年代, 反射波法迅速发展起来, 美国在短时间内出现了很多家地球物理勘探公司, 他们相互竞争, 在美国陆续发现一系列大油田。1933年开始在反射波法中应用组合检波, 1940年出现了24道地震仪, 并带有带通滤波性能的自动增益放大器, 多道混波能力, 还采用了震源组合激发地震波, 共深度点记录是 Harry 在1945年作为减小噪声的一种方法发明的, 磁带记录使得共深度点法成为可能, 这一方法始于1956年, 但直到20世纪60年代末期才被广泛应用, 今天共深度法已成为地震勘探的常规方法。

与陆上地震的发展不同, 大量的海上作业直到1944年才出现, 标志着海上地震勘探开始发展。浮标拖缆首次被使用是在1945—1950年间, 近年来出现的海底电缆使得海上地震勘探出现了前所未有的好形势。

地震勘探中的记录道数也一直在增加。1937年时, 反射波的标准道数是6~8道, 到1940年, 大多数地震队采用10~12道系统, 第二次世界大战后的许多年, 24道成为了标准的道数。到了1981年以后, 大多数地震道数采用48~96道工作。近年来, 使用120~240道工作的地震队已经减少, 大多数是上千道。目前, 上万道, 甚至十万道以上的记录也已经出现。但在工程地震勘探中, 由于勘探目的层较浅, 直到目前还多采用24~48道工作。

检波器的制造技术也一直在发展。最初的地震仪为机械式地震仪, 检波器为无线电话接收器做成的电动式检波器, 这种检波器不久便被电感检波器所取代。早期的电感检波器主要有电容型、可变磁阻型及电动线圈型等三种类型, 使用的是油阻尼介质。随着较好磁性材料的使用, 电感检波器的灵敏度提高了, 重量却减轻了, 电磁阻尼取代了油阻尼。电磁类型的检波器成为陆上工作的主要类型。海上工作主要使用压电式检波器。目前, 数字检波器已经出现, 并有取代上述检波器的趋势。

震源技术也一直随着地震勘探技术在发展。陆上震源除了炸药震源之外, 还有非炸药震源。最简单经济的非炸药震源是采用重锤, 20世纪50年代, 许许多多的地震队采用落重法激发地震波; 而最重要也最巧妙的陆上非炸药震源是可控震源(Vibroiseis), 它是由 Crawford M在1953年提出并首次使用, 并在60年代初得到普遍应用。到了90年代初, 国外陆上地震勘探可控震源队已占陆上地震队的一半。在60年代中期, 海上出现了多种非炸药震源, 如空气枪震源、电火花震源等。这些安全又环保的新式震源的应用不仅提高了生产效

率,也扩大了地震勘探的适应范围。由于新式震源既经济高效,又保护了自然环境,因此迅速地取代炸药震源而成为海上地震勘探的震源。

事实上,地震勘探的发展最重要的标志是记录仪器的发展,以记录仪器为标志,地震勘探的发展可分为三个阶段。

第一阶段(1927—1952年):以光点示波记录、手工作图处理资料为特点。地震仪采用电子管元件,以光点示波的方法得到地震波形记录。其缺点是动态范围小(约20 dB)、频带窄、信噪比低、资料不能重复处理、结果不便于保存,人工处理资料效率低。

第二阶段(1953—1963年):以模拟磁带记录,多次覆盖观测、资料用模拟电子计算机处理为特点。地震仪采用晶体管元件,用磁带记录,然后在室内用回放仪以不同因素反复处理,以达到最佳效果。动态范围稍大(约40 dB)、频带稍宽、信噪比有较大提高,资料处理可实现半自动化,效率较高,结果较有利保存。回放处理结果可得到能直观反映地下地质构造的时间剖面。

第三阶段(1964年至今):以数字磁带记录,高覆盖次数观测,资料用数字电子计算机处理为特点。动态范围大(一般达到84~120 dB以上)、精度高,提高信噪比的手段多而灵活,原始资料的质量、资料处理的自动化程度及解释精度都大为提高,仪器正向遥测、遥控、高采样率、超多道发展,大大加强了地震勘探解决地质问题的能力和效率。

## 二、我国地震勘探发展简史

### 1. 能源地震勘探

1937年,在中国土地上进行了第一次地震勘探,当时正值日本侵占我国东北之时,为了掠夺中国资源,“满洲石油株式会社”在内蒙古的扎赉诺尔和辽宁的阜新为寻找石油进行过地震勘探,但没有发现石油。我国自己的地震勘探起步很晚,直到新中国成立后的1951年,才由翁文波主持成立中国第一个地震队,使用的仪器是美国的24道光点地震仪。20世纪60年代以来,随着我国对石油等能源需求量的大量增加,我国地震队伍的数量也迅速发展,仅石油系统就达到100多个,为大庆、胜利、辽河等大型油田的发展作出了重要贡献。到70年代我国地震队的数量达到顶峰,石油系统已达到290多个,90年代末调整为160多个。

#### (1) 地震勘探仪器

1956年,西安石油仪器厂试制成功了我国第一台地震仪——DZ-571型电子管光电地震仪及DJ-571型地震检波器,并进行批量生产装备了全国地震队。1964年从法国CGG公司引进车装CGG-59型轻便式模拟磁带地震仪及CS-621型回放仪,开始了我国模拟地震记录和回放处理的时代。1965年923厂研制成功DZ-651型24道模拟磁带地震仪,西安石油仪器厂在此基础上试制了DZ-663型模拟磁带仪。1973年我国从法国引进第一批SN338数字地震仪——我国首次引进数字地震仪,开始了地震资料采集的数字化进程。1978年西安石油仪器厂试制成功了SDZ-751A型48道数字地震仪,批量生产后迅速装备了我国的地震队。

通过自己生产和从国外购进数字地震仪,1985年全国地矿系统地震队全部实现数字化,到1987年,全国石油系统262个地震队也全部实现数字化。这是我国地震勘探史上的一个重大技术进步,为地震技术的进一步发展奠定了物质基础。1990年,西安石油仪器厂研制的YKZ-480遥测地震仪试验成功,次年通过了国家鉴定,并先后生产了20余套。1999年,该厂研制的GZY-4000型高精度遥测地震仪通过了国家验收。

## (2) 地震资料处理

用于地震资料处理的大型电子计算机也发展很快。早在1969年,由国务院批准,列为国家重点工程的“150工程”,由石油部有关生产单位和院校研制用于地震资料处理的大型电子计算机DJS-150型计算机于1973年研制成功,并编制了地震资料处理软件。1978年,物探局从法国CGG公司引进了两套CYBER-1724计算机及随机配置的全套地震数据处理软件,这是我国较早为地震数据处理引进的大型电子计算机,从此开始了引进外国大型计算机的过程,到1984年,各油田都有了自已的大型计算机处理系统。1986年,国防科技大学研制成功的亿次级分布式复合多机系统,即“银河”地震数据处理系统,配备物探局和有关院校协作研制的地震资料处理软件,通过国家鉴定后投入使用,大大提高了我国地震数据处理水平。

## (3) 地震勘探技术

在20世纪70年代前后,中国地震勘探在技术方法上取得一系列重大进步。第一是多次覆盖方法:从1970年开始,多次覆盖方法在全国陆上和海上迅速推广开来。1973年,石油部属所有地震队已全部采用多次覆盖方法,这标志着中国地震勘探水平的重大进步。第二是三维地震:1974年,江汉油田物探处进行了三维地震方法试验,在国产小型机121机上用自己研制的软件进行处理,于1977年夏获得了三维偏移剖面,紧接着各油田的三维地震广泛开展起来,到20世纪80年代末,三维地震技术在国内已逐渐完善,特别是20世纪最后几年,三维地震采用了高覆盖次数,全三维处理,精确成像,多信息利用和可视化技术,使三维技术的精度进一步提高,已成为地震勘探中的一项成熟技术。

震源技术也取得了重大进展。早在20世纪60年代中期,石油部所属海洋一队就与中科院电工所联合研制电火花震源,经过4年奋斗,于1970年试制成功国产第一台电火花震源(能量20万至25万J)并投入生产。这是第一种国产非炸药震源,随后发展出一系列电火花震源,包括陆上使用的电火花震源。1974年,地质部所属第一海洋地质调查大队研制成功我国第一台高压空气枪震源,以后研发出系列空气枪震源装备了国内地震队。1981年第一套7吨级KZ-7型国内可控震源在玉门试制成功,不久石油物探局等单位也研制成功系列可控震源及28吨级的大吨位可控震源。在20世纪70年代后期,我国海上地震震源就已经全部采用了非炸药震源,既保护了海洋环境,提高了生产效率和质量,也保证了安全。

我国多波地震勘探研究始于20世纪80年代初。石油部四川石油管理局地调处在四川遂南进行了横波勘探试验,当时用炸药做震源,采用多排井爆炸方法产生SH波。1983年,地矿部第二物探大队在四川阆中进行了转换波试验。后来的十几年里,在9个地区进行了转换波试验,共采集30多条测线实际地震数据,开发研制出一整套转换波处理软件。1998年中国石化集团石油物探研究所开发出“多分量地震资料处理工作站系统”,这是我国第一套成熟的地震多分量处理软件。

多年来,我国地震勘探技术紧跟国际先进水平,不断取得发展和进步。在从简单构造向复杂构造、从浅中层向深层、从构造到地层岩性的发展过程中,锻炼了队伍,发展了技术,在解决我国许多复杂地震地质条件(例如黄土、沙漠、戈壁、沼泽、山地等)下的地震勘探问题方面,已经走到了世界的前列。

## 2. 工程地震勘探

跟能源地震勘探一样,我国在工程领域的地震勘探工作也随着新中国的成立而迅速发展起来。

### (1) 折射波法

我国从 1957 年开始试用浅层地震勘探, 当时主要使用折射波法测定岩土介质的弹性波速度。从 1969 年开始我国已能生产多道光点式轻便地震仪, 并从国外引进了部分轻便地震仪器设备。浅层地震在我国许多部门相继开展, 当时使用的是爆炸震源、光点示波记录, 解释方法是在示波图上读取波的初至时间(“光点”记录阶段), 手工作图进行地震资料解释。

20 世纪 80 年代使用了信号增强型浅层地震仪, 进一步促进了折射波法的发展。通过信号增强, 提高了抗干扰能力、观测精度和分辨率, 仪器轻便、工作效率高、成本低, 扩大了折射波法的应用范围。采集数据记录在磁带上, 通过计算机进行处理, 进一步提高了资料解释的精度和效率, 使那些手工难以解释的时间场法,  $t_0$  差数时距曲线法等很容易实现计算机自动成图。

目前, 折射波法在工程勘察中的应用已十分普遍, 它可用来测定覆盖层的厚度、基岩的起伏情况、测定隐伏断层、破碎带的位置及产状以及评价岩体质量和工程地质围岩分类等, 古老的折射波法至今仍是工程地震勘探中的重要方法。

### (2) 反射波法

由于折射波法须具备一定的物理前提, 要求被探测地层的波速大于上覆地层波速, 并且观测折射波必须在盲区以外, 激发点到接收点之间通常有较大的距离, 因而在许多情况下它的应用受到限制。为了补充折射波法的不足, 长期以来工程地震一直在发展浅层反射技术。

我国从 20 世纪 50 年代后期至 70 年代后期, 浅层反射方法一直处于试验研究阶段, 由于仪器设备性能及方法技术不能适应浅层反射技术的要求, 所以试验研究没有取得多少进展。

20 世纪 80 年代初信号增强型工程地震仪为浅层反射试验与应用提供了条件。它有较宽的工作频率、较高的采样率、能将单次激发较弱的反射信号进行叠加增强, 并有多组前置模拟滤波器和自动增益控制器, 数字记录可在计算机上进行处理。80 年代中期, 地矿、铁道、水电、核工业等有关部门都广泛开展了浅层反射方法研究, 其中包括多种浅层地震震源的方法试验及震源研制、数据采集方法研究、资料电算处理方法研究以及处理软件的研制等。经过地震工作者的不懈努力, 浅层反射技术已取得了突出的成果, 在我国许多重大工程项目中得到广泛应用。目前采用的工作方法有: 浅层纵波反射法, 浅层横波反射法, 反射-折射法联合应用等。观测系统也比较灵活, 有共深度点水平叠加、共炮点接收、最佳窗口技术及最佳偏移距技术等。

由于反射波法不受地层速度逆转的影响, 受施工场地影响也较小, 适应性较强, 获得的地质信息比较丰富, 剖面图像直观而深受工程技术人员的欢迎。浅层反射波法在松散沉积地层中, 对地层层序的划分有很好的效果, 对地基勘察和新构造运动迹象的调查都具有明显的成效。在我国大型坝址勘测、核电站选址、城市建筑工程勘察、地震小区划及场地稳定性评价、工程病害地质调查、人文地质调查中都得到了广泛应用。

### (3) 其他工程地震方法

地震映像技术(共偏移距技术), 由于是在最佳窗口内选择的公共偏移距进行单点激发和接收, 因此不受振幅和相位变化的影响。该方法数据处理简单, 不需作动校正, 不存在由于动校正造成的波形拉伸畸变或近地表宽角反射波引起的畸变。因此, 这种方法在工程勘察中得到了广泛应用。在水上地震勘察中, 利用我国福建省建筑设计研究院制造的具有专利技术的机械式大能量船载连续冲击震源, 采用水上地震映像法结合 GPS 定位导航技术, 使得水上

工程地震勘察变得既简单方便又经济实用。

瑞雷波勘探是一种在地面进行垂直地震横波速度测量的方法,广泛用于地基结构的调查,探测地下空洞、探测地下埋设物以及检测建筑地基密实程度等。在20世纪80年代中期,我国煤炭、铁道、建设部门分别引进日本率先推出的GR810佐滕式全自动稳态面波仪,地矿部门则用国产电磁设备配合浅层地震仪开展稳态面波方法的实验及应用。稳态面波激震设备笨重昂贵,采集效率低,从90年代中期开始很快被瞬态面波法所取代。瞬态面波具有野外采集设备简单、效率高等优点,在我国获得了广泛的推广应用。到目前为止,无论是正反演理论研究还是在工程中的实际应用都取得了较满意的效果。而由于稳态面波法在获取频散曲线能力和质量方面的优势,我国物探工作者一直没有放弃对稳态面波法的研究,近年来在研制更适用的变频设备方面也取得了一些进展。

### 3. 金属矿地震勘探

金属矿地震勘探十分复杂,主要原因在于:相对于油气等能源资源,金属矿所处的地质背景及其勘探所涉及的地震地质条件更为复杂,无论在理论上还是方法技术上,经过几十年发展已趋于成熟的、用于油气等能源勘探的反射波地震勘探技术,都不能直接套用于金属矿勘探。金属矿地震勘探的复杂性主要表现在以下几个方面:

#### (1) 地震地质条件的复杂性

同能源地震地质条件相比,金属矿地震地质条件要复杂得多,主要表现在:①金属矿床往往形态复杂,地层界面连续性差,难以满足现有地震反射方法所依据的反射条件;②目的层界面波阻抗一般较小,有效信号振幅弱;③表层结构复杂、岩性多变,从而引起地震波的激发接收条件多变。

#### (2) 数据采集的复杂性

能源地震勘探是在沉积盆地内进行数据采集,金属矿地震勘探一般需要在与火成岩和变质岩有关的山区或丘陵地带进行数据采集,其复杂性远大于能源地震勘探。

#### (3) 资料处理的复杂性

金属矿地震资料处理尚未形成一套完整的方法技术。目前只能借助于现有的常规处理流程处理金属矿地震资料。实际上,金属矿地震资料中有各类转换波(如P-SV-P波,P-P-SV波等),地震记录中的波场十分复杂。

#### (4) 资料解释的复杂性

金属矿地震资料解释与常规地震资料相比,主要存在如下问题:①由于金属矿区地质构造复杂,各地层之间物性差异较小,因此难以发现较好的标准层;②由于存在复杂断块、岩体侵入以及其他复杂构造,使得地震波组关系变得相当复杂。

由于以上金属矿勘探的复杂性,目前金属矿地震在金属矿勘查中的作用还不是很明显,应用研究程度比较低,尚处于试验和发展阶段,且存在许多难题。若要有效地解决金属矿勘探问题,必须发展新的方法和理论。近些年来,我国在地震波散射,即地球三维非均匀性引起的地震波场变化的研究以及散射波成像技术的研究均取得了很大进展,其理论和方法已被用于金属矿产资源勘探,并获得了一些成功的应用实例。

# 第一章 地震勘探的理论基础

地震勘探是根据人工激发的地震波在岩土介质中的传播规律来研究地质构造或地质体赋存状态的地球物理方法。地震波在介质中的传播特征表现在两个方面：一是波传播的时间与空间的关系，称为波的运动学特征；二是波传播过程中其波形、振幅、频率、相位等的变化，称为波的动力学特征。前者是地震波对地质体的构造响应，后者是地震波对地质体岩性特征的响应。我们把上述两种特征统称为地震波的波场特征。实际上，地震勘探就是通过研究地震波的波场特征来进一步研究地下地质构造或地质体赋存状态的一门科学。

## 第一节 弹性理论概述

### 一、弹性介质与粘弹性介质

#### 1. 弹性介质

在外力作用下，固体的体积或形状会发生相应的变化，这种变化称为固体的形变，当外力去掉后，固体又恢复到原来的状态，这种特性称为弹性。具有这种特性的固体叫做完全弹性体或理想弹性体，其形变称为弹性形变，如弹簧、橡皮等。反之，若外力去掉后，固体不能恢复原状，而是保持受外力作用时的状态，这种特性称为塑性，具有这种特性的固体称为塑性体，其形变称为塑性形变，如橡皮泥等。

在外力作用下，一个固体产生弹性形变还是塑性形变，取决于一定的条件：是否在弹性限度之内。这同固体所受外力的大小、作用时间的长短及固体本身的性质有关。一般说来，如果作用力不大，作用时间又很短暂，则大部分固体产生的是弹性形变；反之，若作用力很大，或作用时间很长，则大部分固体表现为塑性形变，甚至发生破碎。

自然界中绝大部分固体，在外力作用下，既可以显示出弹性，也可以显示出塑性。在地震勘探中，人工激发的震源是脉冲式的，作用时间很短（小于 100 ms），一般接收点离震源有一定距离，该处的岩石、土壤受到的作用力很小，因此，可以把岩、土介质看作弹性介质，用弹性波理论来研究地震波。

在研究弹性理论时，可将岩、土的性质分为各向同性和各向异性。凡弹性性质与空间方向无关的介质称为各向同性介质；反之，则称为各向异性介质。在地震勘探中，只要岩土性质差异不大，都可以将岩土作为各向同性介质来研究，这样可使很多弹性理论问题的讨论大为简化。

#### 2. 粘弹性介质

固体在小外力、长时间作用下会出现不能恢复原状的形变，这种外力撤消后形变仍然存在的性质与粘滞性的液体性质十分相似，称这种性质为粘滞性。运动（或者波动）在粘滞性的介质中传播时，介质中会产生一种阻碍这种运动的应力，这种力称为粘滞力或者内摩擦力。既有弹性、又有粘滞性的性质称为粘弹性，具有这种性质的固体称为粘弹性介质。

在实际的地震勘探中，人们发现在地面接收到的地震波不同于激发时的信号，它的波形要

变“胖”，振幅也变小，这是由于岩土层对其中传播的地震波有吸收作用，吸收了激发信号中的某些高频成分，使其能量发生损耗，并使地震波形发生改变。显然，岩土层这种既有弹性、又有粘滞性的性质就是粘弹性，岩土层就可以称为粘弹性介质。实际的岩石固体更接近于粘弹性介质，从理想弹性介质模型到粘弹性介质模型是由理想化的模型向实际介质跨了一大步。

## 二、应力与应变

既然在地震勘探中，地震波所传播的实际岩层可以抽象地作为理想弹性介质来研究。因此，在震源(外力)作用下，弹性体就会发生形变，可以用应力和应变的概念来描述这种作用力和形变之间的关系。

### 1. 应力

设有一圆柱状直杆，长度为 $l$ ，直径为 $d$ ，横截面积为 $S$ ，如图1.1.1所示。该直杆受到一个不大的外加拉力 $F$ 时产生形变，长度变为 $l' = l + \Delta l$ ，直径变为 $d' = d - \Delta d$ 。同时，直杆内部质点之间会产生一个对抗外力使固体恢复原状的内力。显然，该内力垂直于直杆的横截面，它的大小应和外力相等，但方向相反。

在弹性理论中，将单位面积上所产生的内力称为应力，用 $\sigma$ 表示。

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1.1.1)$$

为了更一般地表示应力，考察空间中一平行六面小体积元的应力分布，如图1.1.2所示。当物体处于平衡状态时，六面体3个可见的侧面上分别沿 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴上作用3个不同的应力向量，而每个应力向量又可沿垂直于坐标轴的面积元上分解成3个不同的应力分量。

对于 $xOy$ 面元，其应力分量为： $\sigma_{xx}$ 、 $\sigma_{yy}$ 、 $\sigma_{zx}$ ；

对于 $xOz$ 面元，其应力分量为： $\sigma_{yx}$ 、 $\sigma_{yy}$ 、 $\sigma_{yz}$ ；

对于 $yOz$ 面元，其应力分量为： $\sigma_{xx}$ 、 $\sigma_{xy}$ 、 $\sigma_{xz}$ ；

其中第一个下标表示面元的法线方向，第二个下标表示应力分量的作用方向。在这9个应力分量中，与面元垂直的应力分量称为法向应力，即： $\sigma_{xx}$ 、 $\sigma_{yy}$ 、 $\sigma_{zz}$ ；与面元相切的应力分量称为切应力，即： $\sigma_{xy}$ 、 $\sigma_{xz}$ 、 $\sigma_{yx}$ 、 $\sigma_{yz}$ 、 $\sigma_{zx}$ 、 $\sigma_{zy}$ 。

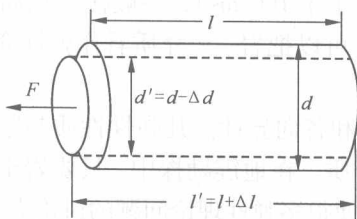


图 1.1.1 直杆拉伸试验中的应力与应变

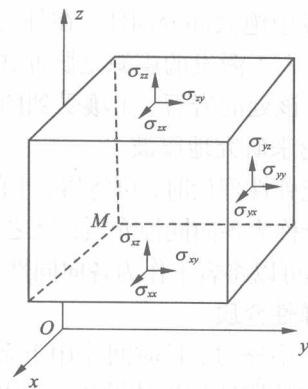


图 1.1.2 单位体积元上的应力分布



当体积元处于相对静止平衡状态时,可以证明:  $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$ ,  $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$ ,  $\sigma_{yz} = \sigma_{zy}$ 。此时, 9 个应力分量中有 6 个是相对独立的。

## 2. 应变

弹性体在应力作用下产生的体积和形状的变化叫做应变。

### (1) 正应变

正应变包括体应变和线应变。

弹性体在正应力作用下, 体积发生变化(膨胀或压缩), 体积的相对变化就是体应变, 通常用  $\theta$  表示, 如图 1.1.3 所示。

$$\theta = \frac{\Delta V}{V} = \frac{V' - V}{V} \quad (1.1.2)$$

式(1.1.2)中表示体积发生膨胀时的体应变, 如果是体积压缩, 则  $\Delta V = V - V'$ 。

体应变是由线应变组成的, 线应变是单位长度的伸长(或缩短)量, 一般用  $e$  来表示(图 1.1.1 中线应变  $e = \frac{\Delta l}{l}$ )。

为了定量描述弹性介质的应变状态, 我们讨论物体内部一小体积元受应力作用发生体积变化时的情况。则小体积元中任一质点  $P$  在应变状态下空间上的位移  $\mathbf{u}$  可表示为:

$$\mathbf{u} = ui + vj + wk \quad (1.1.3)$$

其中:  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为体积元的质点沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的位移分量。为方便分析, 先考察体积元  $yOz$  平面沿  $y$  轴方向的线应变的情形, 如图 1.1.4 所示。

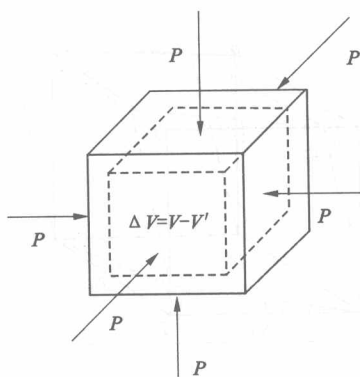


图 1.1.3 立方体单元受力后的体积压缩

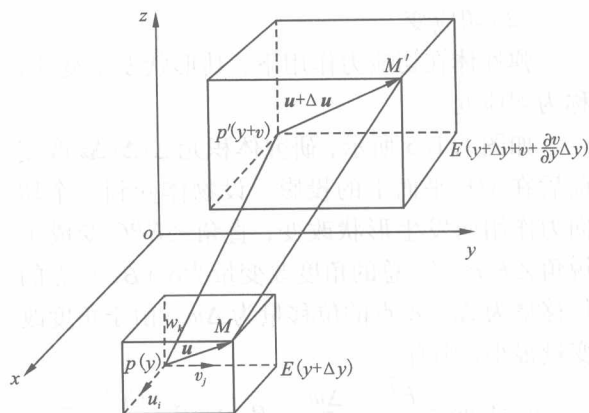


图 1.1.4 体积元棱边的形变

在沿  $y$  方向的作用力下, 体积元的棱长由  $\overline{PE}$  变至  $\overline{P'E'}$ , 其坐标位置分别为

$$P(y), \quad E(y + \Delta y), \quad P'(y + v), \quad E'\left(y + \Delta y + v + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y\right)$$

式中:  $\frac{\partial v}{\partial y}$  为体积元的位移沿  $y$  轴方向的变化率。因此, 体积元棱长拉伸后的长度是

$$\overline{P'E'} = \left(y + \Delta y + v + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y\right) - (y + v) = \Delta y + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y$$

从而体积元棱长的相对增加量, 即沿  $y$  轴方向的线应变  $e_{yy}$  为