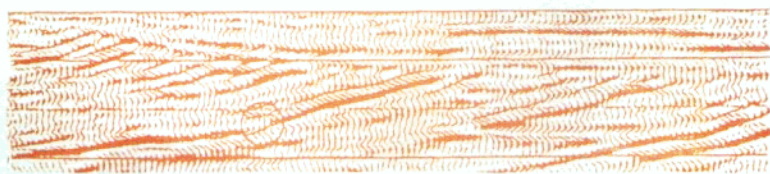
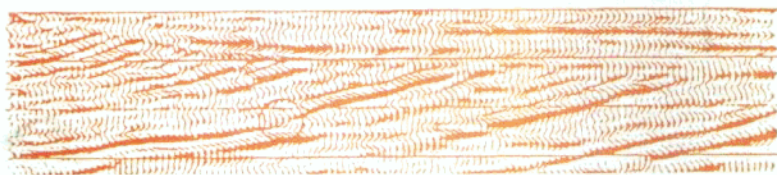
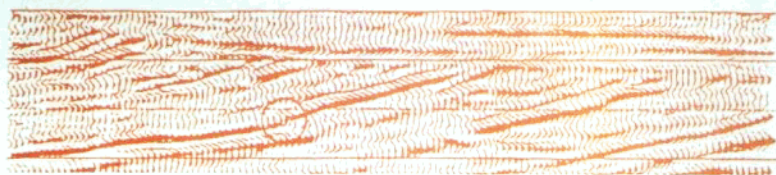
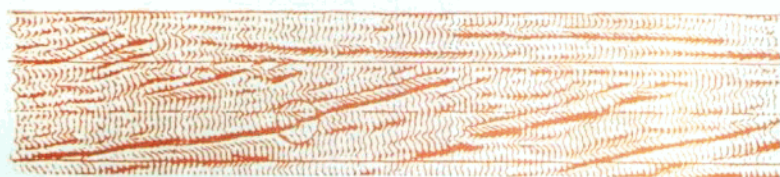


采区高分辨率三维地震勘探

张爱敏 著



中国矿业大学出版社

前 言

10 多年来,由于高分辨率地震勘探技术引入与推广,使煤田二维地震勘探精度从查明幅度大于 30 m 迅速提高到大于 10~15 m 的断层与褶曲,从资源勘探步入开发勘探。采区高分辨率三维地震勘探于 1993~1994 年在淮南谢桥煤矿东、西采区首次成功应用表明:在地震地质条件较好的地区,在现有装备及技术水平条件下,能够查明埋深 400~700 m 深度范围内、落差大于 5 m 的断层,部分解释出落差小于 5m、延伸小于 100 m 的断层与断点。从而将煤田地震勘探精度或分辨断层从落差 10~15 m 提高到 5~10 m,又上了一个新台阶。

此后,我国两淮、山东、河南、河北等许多采区运用了该项技术。它为煤矿采区的开发决策、巷道布置与开拓提供了可靠依据;它在勘探小断层、褶曲、巷道、陷落柱、老窑、采空区等检测工程及解决问题的能力上是二维地震勘探无法比拟的,在预测采区煤层厚度、顶底板岩性变化、采区水文地质评价等方面都展示了它潜在的能力,预示着高分辨率三维地震勘探在煤矿开发中必将得到更加广泛的应用。

此书是本人在多年教学科研的基础上,并参阅国内外有关文献而撰写的。它将理论、方法、实例三者融为一体,较系统地阐述了野外资料采集、资料处理、资料解释等方面工作的技术方法和经验。

近年来,本人对采区高分辨率三维地震勘探有一定的研究,主持负责的科研项目——淮南谢桥煤矿采区高分辨率三维地震勘探,获 1995 年煤炭部科技进步二等奖;科研项目——采区高分辨率三维地震勘探,获 1996 年国家科技进步三等奖。

在此,向参与该项目研究工作的中国矿业大学刘天放、崔若飞、李海山、董守华,淮南矿务局杨宗震、张炳光、孙茂也,安徽物测队汤英侠、龚远武等表示衷心感谢!

采区高分辨率三维地震勘探,在我国煤田开发中正处于蓬勃发展时期,其重要性已被越来越多的人所认识,急需一些比较全面介绍适合“煤”特色的采区三维地震勘探的材料,为此,作者愿抛砖引玉,将本书献给从事该工作的广大工程技术人员,不当之处,敬请谅解和指正。

作者

1997 年 4 月

1997/4/10 OP

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 采区三维地震勘探的必要性	(1)
第二节 三维地震勘探原理	(11)
第三节 采区三维地震勘探特点	(15)
第二章 采区三维地震勘探数据采集	(20)
第一节 采区三维地震勘探野外采前试验	(20)
第二节 采区三维地震勘探野外观测系统	(22)
第三节 有关三维地震勘探野外采集参数的几个问题	(31)
第四节 采集参数的选择	(35)
第五节 野外数据采集时的质量监控	(45)
第三章 采区三维地震勘探数据处理	(48)
第一节 采区三维地震勘探数据处理概述	(48)
第二节 基础资料编辑	(52)
第三节 近地表模型	(53)
第四节 折射静校正	(55)
第五节 反褶积	(57)
第六节 叠后吸收衰减补偿	(61)
第七节 DMO 叠加与偏移	(67)
第八节 叠后偏移	(78)
第九节 深度偏移	(86)
第四章 三维地震勘探资料解释	(90)
第一节 三维数据体特点	(90)
第二节 三维地震勘探资料的解释特点——人机联作	(92)
第三节 等时切片	(93)
第四节 解释方法和步骤	(99)
第五节 人机联作——断层、褶曲解释	(101)
第六节 速度标定与构造图绘制	(109)
第七节 复杂地质构造模拟解释	(114)
第八节 人机联作地震资料解释系统简介	(121)
主要参考文献	(125)

第一章 概述

第一节 采区三维地震勘探的必要性

一、引言

随着大型矿井建设的发展,越来越需要为综采工作面的布局、巷道布置与开拓提供精确细致的地质构造信息。综采工作面的生产能力和效益在很大程度上依赖于小构造(垂向落差5 m左右的断层,幅度5 m左右的褶曲)的查明程度。淮南矿务局综采工作面的实际开采资料表明:在正常良好的地质构造条件下,综采面月进尺70~100 m,月产煤量5~8万t。当综采面有落差近煤厚(3~5 m)的断层或急变小型褶曲等不良地质条件下,工作面月进尺10~

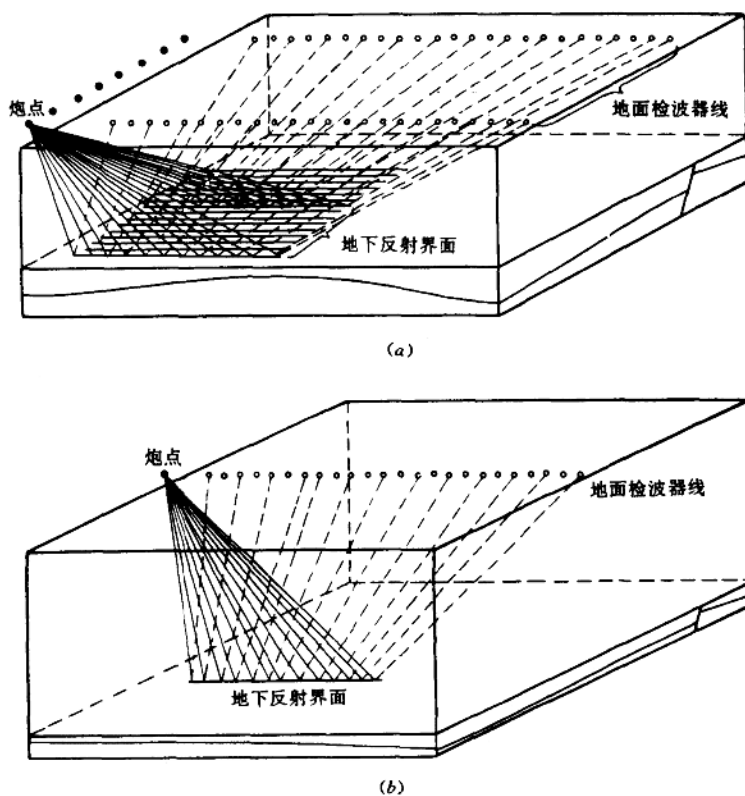


图 1-1 野外观测示意图

a—三维地震勘探野外观测示意图;b—二维地震勘探野外观测示意图

40 m,最小进尺只有几米,比正常良好地质条件效率低 60%~90%。当遇到有落差大于煤厚的断层时,要过断层重开工作面,延误工期 1~2 个月,少产煤 5~10 万 t,产量损失 1000~2000 万元。因此,查明采区细微地质构造,解决困扰综采工作能力和效益问题是煤田地震勘探必须攻克的难题,也是二维地震勘探难以解决的。为此,必须在采区进行高分辨率三维地震勘探,要使得得到 x, y, z (深度) 三个方向上的数据信息与实际地质体相适应。采区三维地震勘探在地面上同时布置规则或非规则多条观测线 and 多个激发点,故称为面积勘探技术。图 1-1a 为三维地震野外观测示意图,这种观测方法对于地下测点而言是来自四面八方的信息,具有较好的聚焦作用。图 1-1b 为二维地震勘探野外观测示意图,每次布设一条观测线。图 1-2a 为三维地震勘探聚焦点(反射点)道集,图 1-2b 为二维地震勘探共反射点道集形式。显然二维只能沿测线方向收集和聚焦。

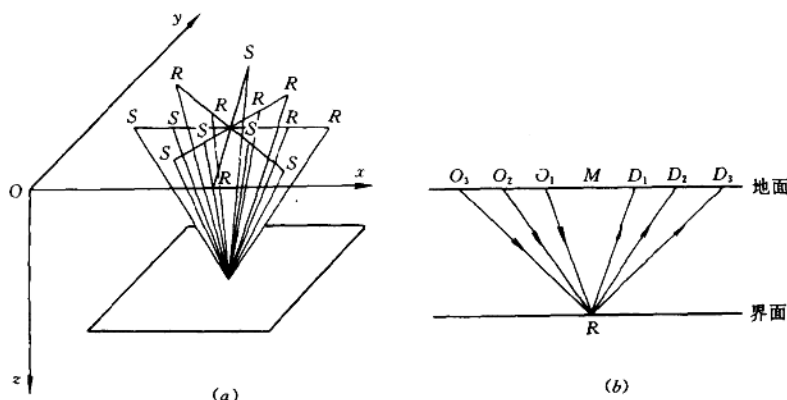


图 1-2 共反射点道集示意图

a—三维地震勘探共反射点道集;b—二维地震勘探共反射点道集

二、三维地震勘探的必要性

80 年代以来,我国成功地应用推广煤田高分辨率地震勘探,勘探精度从查明 ≥ 30 m 落差的断层,提高到能查明 10~15 m 落差的断层,使地震勘探从单纯的资源勘探步入开发勘探。它以其高分辨率、高精度的优势,在 13 个省市自治区、38 个矿区、“八五”期间建设的 68 对矿井,进行了达产采区地震勘探工作,查明落差 ≥ 10 m 的断层,幅度 ≥ 10 m 的褶曲以及陷落柱、采空区等与灾害地质有关的地质异常。初步估计,避免了矿井在建设及生产中约 40 亿元的经济损失。

尽管如此,该方法受“二维”的局限性,使其信噪比、分辨率及地质异常成像清晰度受到影响,从而也妨碍了勘探精度的进一步提高。原因在于地下地质构造形态大多数都不满足二维地震勘探所假设的条件,二维地震勘探要求地下的构造形态只在一个垂直于深度的方向上变化,若在 x 方向上有变化, y 方向上完全一致,即无变化;若在 y 方向有变化, x 方向完全一致。唯有这样的条件,二维地震勘探原理才真正得到满足。三维地震勘探则不同,它的原理与条件与三维地质体相适应。用三维地震勘探研究构造很容易得出正确的构造形态及其各种显示图像,这是因为三维偏移是在空间上进行的。各点都按真倾角方向偏移的,各点

的波可以回到各自的反射点位置上去。而二维偏移是沿测线视倾角方向进行的,偏移的结果是不完全的,也是不准确的。例如,图 1-3 为一地质模型,地下是一均匀的倾斜平界面,测线 A 沿倾向布设,那么地下界面的二维假设成立,如图 1-4a 所示,记录不到断面外的信号。当二维偏移之后,地表点 X 下面的 D 点向上倾方向移到它真正的地下位置 D' 点。假若测线 B 沿走向线布设(A 与 B 交于地表点 X),而地下界面上的 D' 点反射波记录在两条测线 A 和 B 交点 X。而在 B 测线上观测反射波的同相轴可能是侧反射, A 测线则不是,且走向方向上的倾斜界面反射没有视倾角,见图 1-4b。由于偏移不改变水平同相轴的位置,走向线偏移前后时间剖面上没有时间差,假若把倾向线 A 与走向线 B 的偏移剖面连在一起,就会出现闭合差。

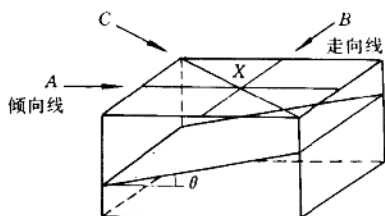


图 1-3 均匀介质中一个倾斜平界面地质模型
A—测线位于倾向方向; B—测线位于走向方向;
C—测线为任意方向

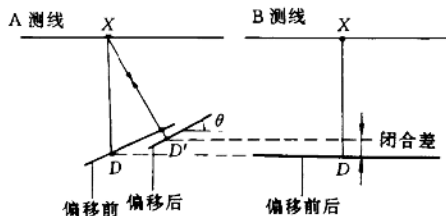


图 1-4 沿倾向线和走向线的偏移示意图
a—沿倾向线的偏移; b—沿走向线的偏移

构造勘探中地下界面一般是多方位倾向,很难在勘探前就肯定测线的布置是倾向还是走向,尤其对圈闭构造更是如此。即使是单斜构造,如图 1-3 中的 C 测线那样布设,则得出来的视倾角比 A 线观测的真倾角小。图 1-5 是三维地震勘探的一条纵测线叠加剖面(左列)和横测线叠加剖面(右列),以及它们的二维和三维偏移剖面,三维偏移剖面较好地确定出了盐丘顶,同时画出了盐丘基底的断层,无疑基于二维成像的解释与基于三维成像的解释存在着明显的差别。

下面是二个采区勘探对于断层和巷道检测的实例。

例 1 比较同一采区、相同地段获得的二维勘探和三维勘探结果,图 1-6 为时间剖面图,图中 T_5 为 13-1 煤反射波; T_8 为 8 煤反射波。在二维地震剖面中,煤层反射波远不如在三维地震剖面中清晰,8 煤层反射波更是不能连续追踪。在图 1-6b 中 T_8 波明显增强,使之能可靠对比。同时,可见到三维剖面上 T_8 、 T_5 波都只是 1~2 个强同相轴,连续相位少而弱,使 13-1 煤及 8 煤反射波突出,获得了比二维地震剖面更高的信噪比及分辨率。

图 1-7 为淮南谢桥煤矿东一采区 13-1 煤三维与二维地震断层解释结果对比图,不难看出:对于 F_{10} 、 F_{11} 、 F_{12} 三条落差大于 10 m 的断层,二维与三维结果基本一致,而落差小于 10 m 的断层,组合方案与原组合方案明显不一致,对于落差小于 10 m 的 14 个断点与三维勘探结果的符合率不足 20%。

例 2 采区三维地震勘探较准确地检测到埋深 400~600 m,截面 $3.2 \times 3.8 \text{ m}^2$ 的巷道。谢桥煤矿是一个在建矿井,在三维地震勘探施工之前,整个矿井及首采区主要巷道已经开

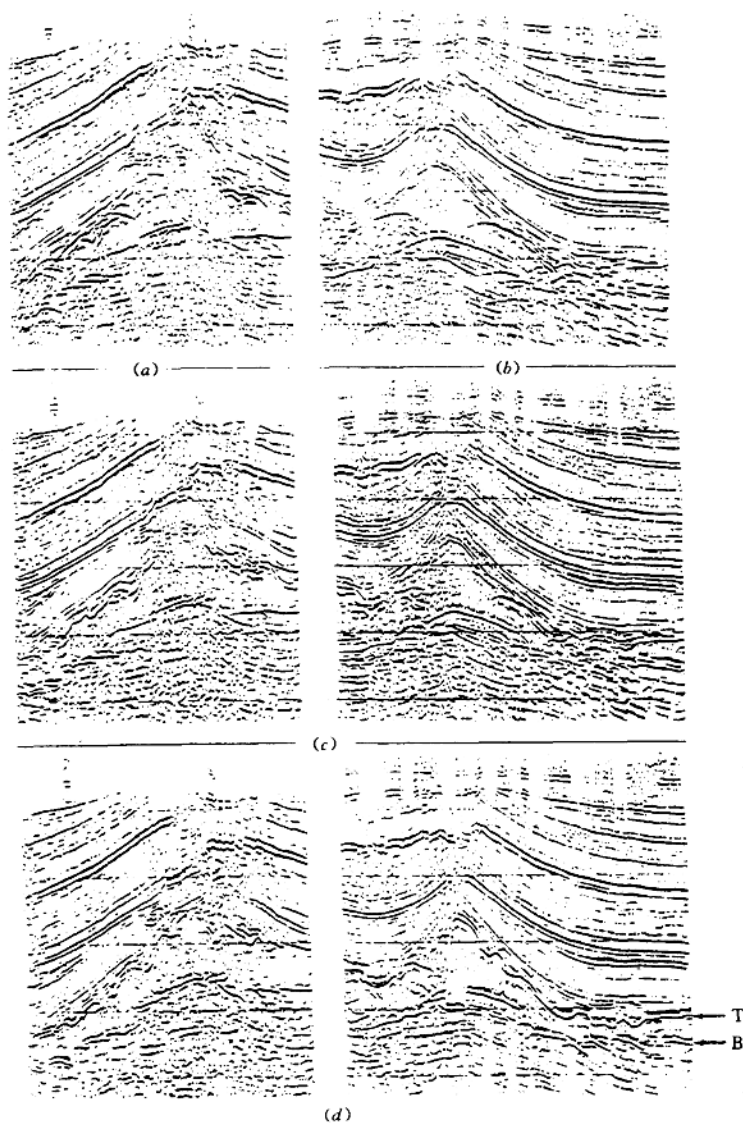


图 1-5 三维陆上调查的一测线叠加剖面与偏移剖面

a—纵测线叠加剖面；b—横测线叠加剖面；

c—二维偏移剖面；d—三维偏移剖面

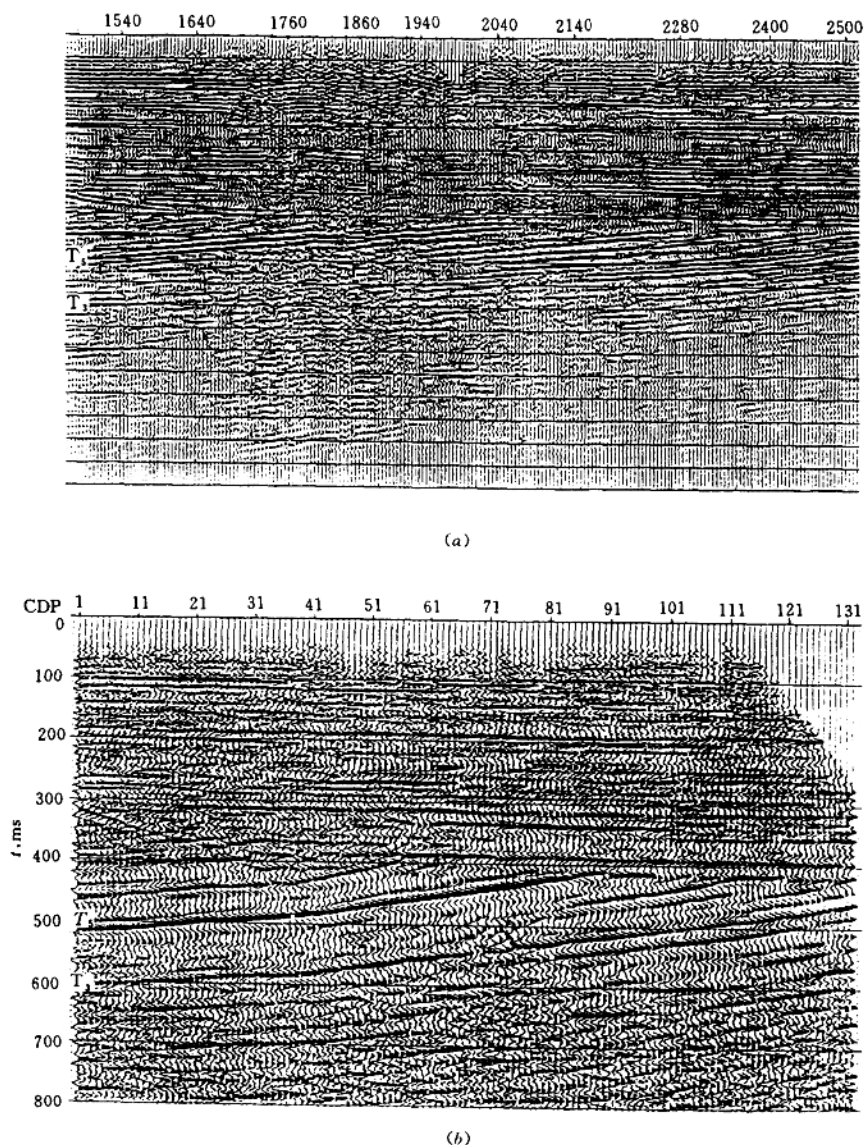


图 1-6 三维时间剖面与相应二维时间剖面比较

a—二维 8 线; b—三维 EX71(36)线

拓,施工结束前东一采区巷道展布如图 1-8 所示。C 组石门从 13-1 煤穿过 11 煤,直向 8 煤开拓的巷道,其断面为 $3.2 \times 3.8 \text{ m}^2$,它们只有 2% 的坡度,沿地层倾向近南北向延伸。C 组石门埋深 460 m,有回风主、副石门两条巷道,相互平行,相距 50 m,位于东一测区中央,回风主、副石门分别 EX 213(107)、EX 223(112)(注()内为插值前编号)几乎平行,仅是 $1^\circ \sim 3^\circ$

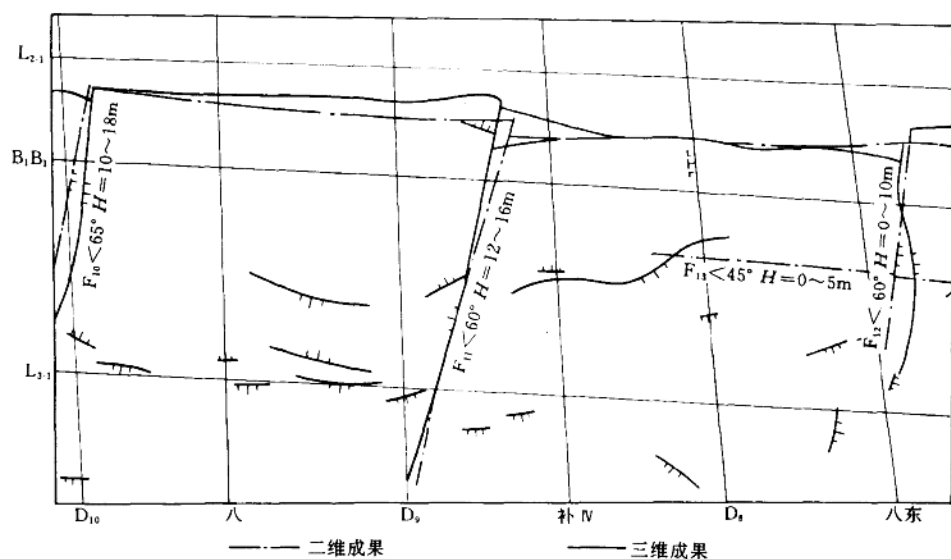


图 1-7 淮南谢桥煤矿东一采区 13-1 煤层三维与二维地震断层解释结果对比图

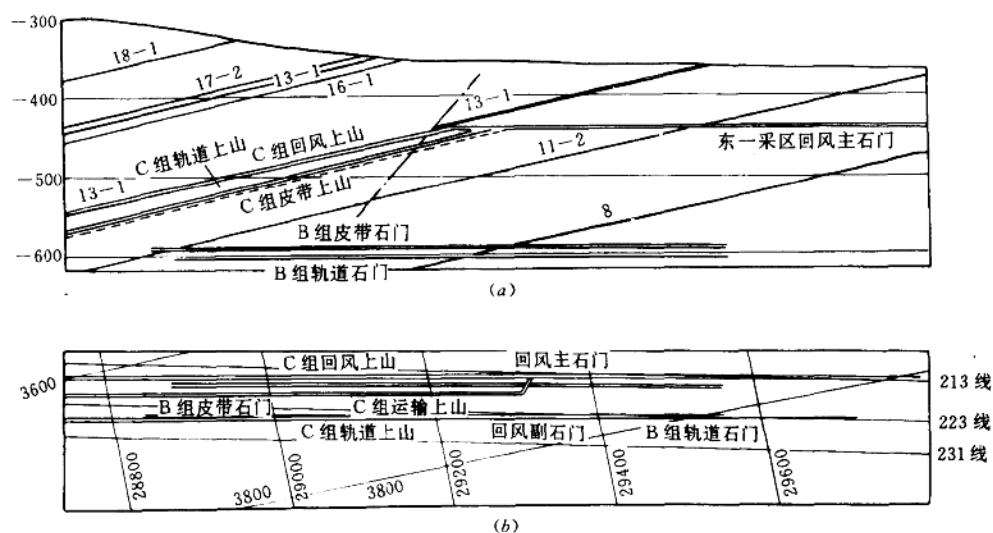
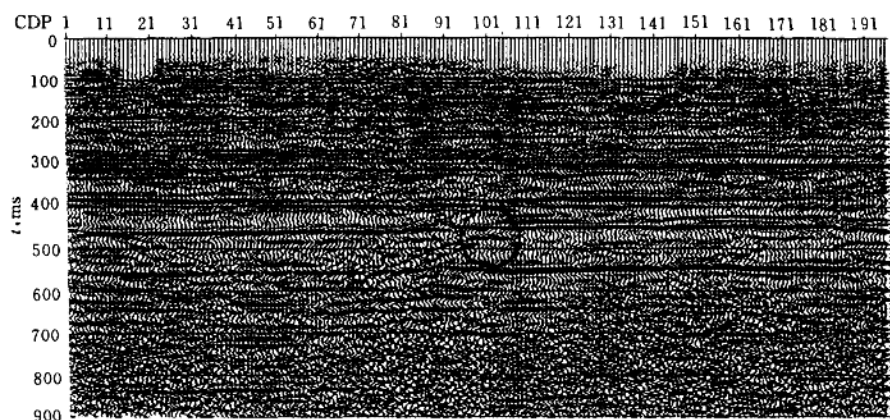


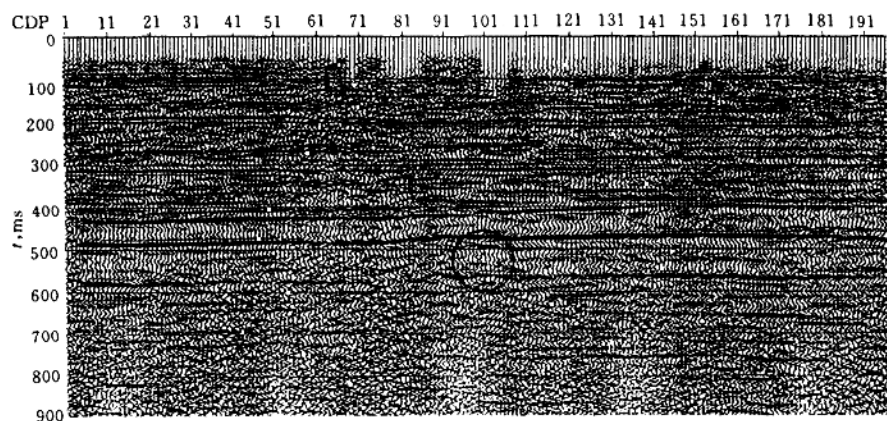
图 1-8 淮南谢桥煤矿东一采区巷道及部分纵线分布图

a—剖面图; b—平面图

斜交,跨越 CDP 号(每个 CDP 是 10 m)分别为 EY136~189(68~98)、EY 112~218(56~109),近 30~50 个 CDP(表 1-1)。



(a)



(b)

图 1-9 巷道的绕射

a—埋深约 460 m 主、副石门巷道绕射波;*b*—埋深约 620 m B 组石门绕射波

B 组石门,有皮带石门及轨道石门两条,相互平行,水平面上相距 40 m 左右,居测区中央,分别与 EX 225(113)、EX 217(109)几乎平行,呈 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 斜交,跨越 CDP 段分别为 EY 32~64(18~32)、EY 48~98(24~29)。但它们分别埋藏在 613 m 及 623 m 深度上(表 1-1)。

沿煤层顶板开拓的回风(人行)上山及沿煤层底板内开拓的皮带上山与轨道上山,沿倾向延伸。皮带、轨道上山与煤层近平行相距 13~18 m。C 组与 B 组共 6 条巷道都分布在测区中央,空间上是分开的,与其近乎平行的控制线号见表 1-1。

本次勘探能清晰检测到巷道反射波,原因是巷道是一个充满空气的腔体,埋藏在 460~600 m 深度上,与地震波长及菲涅尔带相比,可视为单向延伸的线状强绕射体(图 1-9a、b),其绕射波恰似一个“薄膜种菜大棚”,沿垂直巷道走向分布。当只沿巷道走向(地层倾向)偏移

时,没有能量收敛,不能显示(图 1-10),只有当完成垂直巷道方向(地层走向)偏移后,才能将绕射能量收敛于巷道,在横剖面上出现“眼眉状”的“亮点”(图 1-11),在顺巷道方向才能呈现出与煤层倾斜反射波相交叉的水平巷道反射(图 1-12),在相应的时间切片与巷道位置相对应处,呈现两条清晰的扰动带(图 1-13),这是二维地震勘探所不能及的。

表 1-1 淮南谢桥煤矿东一采区巷道展布一览表

类 别	组 别	巷道名称	埋深,m	断面,m ²	与巷道相重的纵测线号	跨越的 CDP 号
石 门	C 组	回风主石门	460	3.2×3.8	EX 213 (107)	EY 135~189 (68~95)
		回风副石门	460	3.2×3.8	EX223 (112)	EY 111~217 (56~109)
	B 组	皮带石门	613	3.2×3.8	EX 225 (113)	EY32~64 (18~32)
		轨道石门	613	3.2×3.8	EX 217 (109)	EY48~98 (24~49)
上 山	C 组	回风上山		3.2×3.8	EX 215 (103)	EY51~111 (26~56)
		皮带上山		3.2×3.8	EX 219 (110)	EY 51~111 (26~56)
		轨道上山		3.2×3.8	EX 225 (113)	EY 31~119 (16~60)

注:()内为插值前编号。

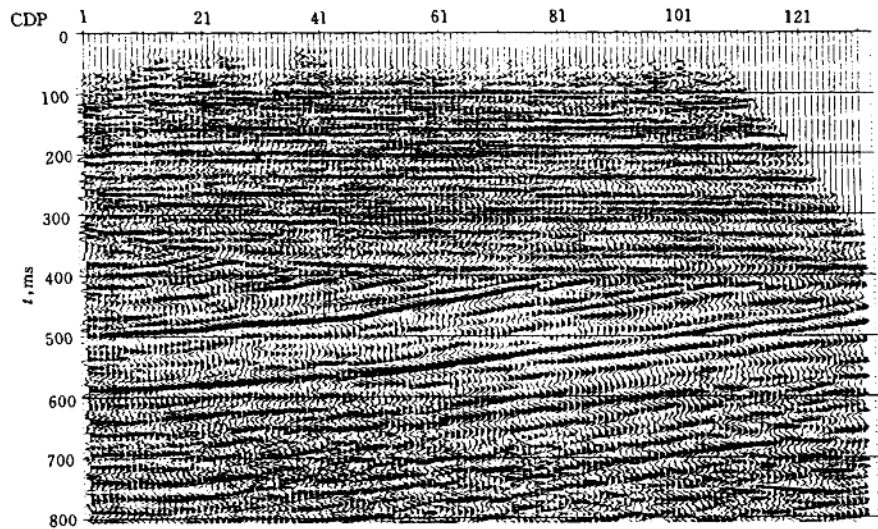


图 1-10 沿巷道走向偏移后时间纵剖面无巷道显示

综上所述,不难看出三维地震勘探具有高分辨率、高信噪比、高清晰成像、高精度归位的

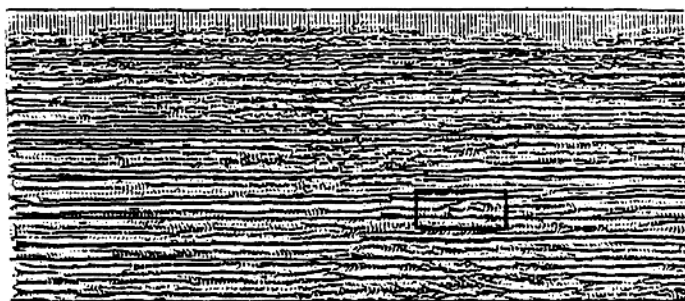


图 1-11 沿巷道横剖面偏移两石门巷道绕射波收敛为一对“眼眉”

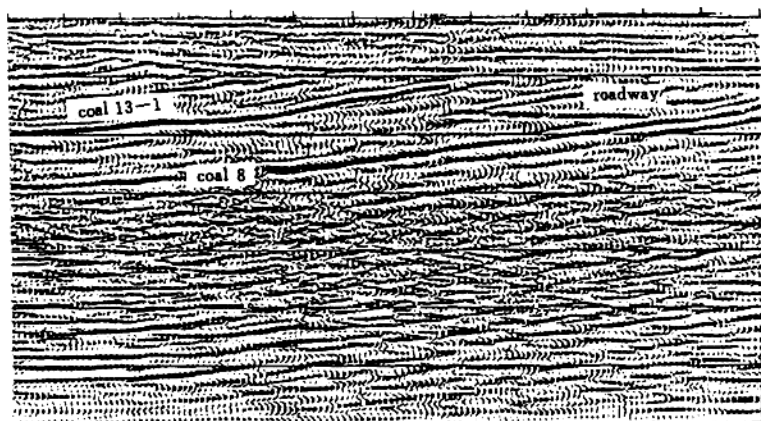


图 1-12 EX 213(107)线经三维偏移石门巷道显示

特点。它在查明主要煤层的构造形态、赋存深度、落差 5 m 左右的断层及其准确位置,探讨解决与工程地质、灾害地质有关的陷落柱、采空区等其它问题方面有着广阔的前景。

三、国内外煤田三维地震勘探的应用及研究状况

自 70 年代以来,由于电子技术的飞速发展,多道数字地震仪及巨型计算机的出现和应用,数字处理技术的发展,三维地震勘探才逐渐发展起来,并步入实用阶段。到 80 年代末,世界上约有 100 多个含油气区块进行了三维地震勘探。70 年代末,从江汉油田开始试验,中国也普遍进行了三维地震勘探。它在研究复杂构造、岩性与含油气的横向变化、寻找隐蔽油气田、进行储量计算、准确确定孔位等工作中,取得了十分显著的地质效果与经济效益。

1975 年,德国普兰克拉-蔡斯莫斯公司首先将三维地震勘探技术用于鲁尔煤田勘探,此后,约有近 70% 的煤田地震工作采用了三维地震勘探,与钻孔配合划分采区,合理确定井筒

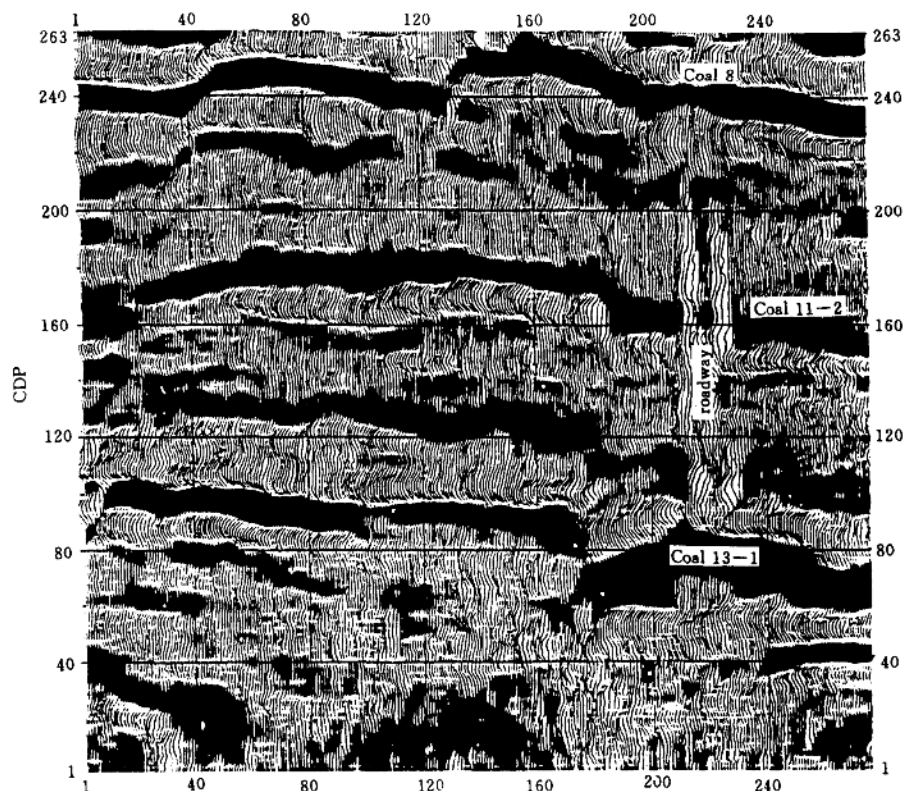


图 1-13 两石门巷道在 473 ms 时间切片上的显示

位置、布置巷道及工作面,使钻孔密度下降到 $0.7 \sim 2$ 个/ km^2 ,大大降低了成本。中国煤田三维地震勘探试验最早于 1978~1979 年在伊敏河矿区资源勘探区的北部构造复杂地带进行,1983 年底完成处理及报告编制工作,进行了资料、成果评审,在中国煤田地质总局引进了 IBM4381 计算机及 TEMPIX 处理后,对资料重新进行处理,于 1987 年提出新的处理结果,查明了落差 20 m 左右的断层。80 年代后期,在唐口勘探区资源勘探工作中,5.4 km^2 范围内进行了中国第二项三维(面积)勘探,全部资料是在日本处理的,查明了落差 10~15 m 的断层(表 1-2)。除了以上三维勘探之外,先后还在山西朔南、陕西麟游和凤翔等勘探区及马栏煤矿进行过弯线与宽线勘探,都取得了显著的地质效果及经济效益。

然而,所有这些工作,都没有直接用以查明 5 m 落差小断层和决定综采工作面布置为主要目标的矿井生产采区勘探。从 1993 年 10 月至 1994 年 12 月淮南谢桥煤矿东、西一采区首次应用“高分辨率三维地震勘探”取得丰硕地质成果之后,国家开发行下达(1995)14 号文件指出:为查明 3~5 m 落差的小断层、拟建大型矿井,有条件的采区均要进行高分辨率三维地震勘探。于是,采区三维地震勘探迅速地在全国许多采区推广和应用(表 1-3),这也充

第一章 概 述

分说明采区三维地震勘探开创了煤田地震勘探新局面,使勘探精度上了新台阶。

表 1-2 国内以往煤田三维(面积)勘探情况表

地区	伊敏河矿区	唐口勘探区
时间,年	1987(采集 1978~1979)	1992(采集 1988)
面积,km ²	7.3	5.4
仪器,道	TYDC-24×2 96	SN338HR 96
采样速率,ms	(相当于)1.25	2
检波器	D25-5-70	100 Hz
组合形式	4×2+5	9 个面积组合
观测系统	十字型	4 组 6 炮制
线距,m	30	20
道距	30	20
最小炮检距,m	$\sqrt{15^2+15^2}$	$\sqrt{40^2+15^2}$
最大炮检距,m	$\sqrt{225^2+165^2}$	$\sqrt{500^2+225^2}$
叠加次数	6	12
CDP 网络	15×15	10×15
效果	查明落差 20 m 左右断层	查明落差 10~15m 断层

注:该表统计于 1996 年 5 月。

表 1-3 采区高分辨率三维地震勘探情况一览表

时间,年,月	矿名	采 区	面积, km ²	完 成 情 况
1993.10	谢桥	东、西一采区	4.14	1994.9
1995.1	潘三	西二采区	2.4	1996.2
1995.2	潘三	东一、二采区	3.3	1996.2
1995.3	茅庄	(地方矿)	1.0	完成处理解释
1995.10	开滦	(查岩浆岩体)	0.6	完成处理解释
1995.12	姚桥	达产采区	4.0	完成处理解释
1995.12	潘三	西部下山采区	5.0	完成施工
1996.2	陈四楼	北一采区	4.0	完成施工
1996.3	潘三	东四采区东翼	1.1	完成施工
1996.3	潘一	西三采区西翼	1.3	完成施工
6 个局 8 个矿		13 个采区	28.24	

注:据了解近两年还将有 7 个局 8 个矿 10 个采区进行三维地震勘探。

第二节 三维地震勘探原理

采区三维地震勘探常用反射波法进行。三维反射波法和二维反射波法在基本原理和实用技术方面有很多相似之处,也可以说二维反射法是三维反射法的特殊情况,不过在假设条件、求导原理方法和实用技术方面,三维地震反射法与二维地震反射法有许多不同之处。下

面简要介绍三维地震反射法的原理,并从实用出发,避免更多的公式推导。

一、波动理论

现有的反射法波动理论,常用绕射叠加原理和散射原理叙述,二者实质是相同的。这里介绍绕射叠加原理。

1. 绕射叠加理论

惠更斯-菲涅尔原理所描述的内容,即绕射叠加理论,其基本原理是地震波从炮点激发后,以球面波方式向下传播,碰到反射界面后,把反射界面上每一个点看作是一个新震源,再从新震源发出二次扰动,向四面八方传播开来,对某一接收点 P 而言,它所接收的反射波就是界面上所有扰动波的叠加总和。具体地说,就是将反射界面视作许多小反射面元产生的绕射波按传播路径差,在时间上错开并考虑能量的大小后,一个个叠加起来,作为 P 点接收到的反射波。在 P 点接收到的波动的能量并不是来自反射界面的某一点,而是来自界面上的所有点。就波场函数为球面波的情形,纵波方程表述为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - f(x, y, t) \quad (1-1)$$

即

$$\Delta u - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + f(x, y, t) = 0$$

式中 u —— 波场函数, $u = u(x, y, z, t)$;

v —— 波速;

$f(x, y, t)$ —— 波源密度函数(描述波场分布的已知函数)。

设 $P(x_0, y_0, z_0)$ 为观测点,要确定波场 $u(x, y, z, t)$ 在 P 点的值 $u(x_0, y_0, z_0, t_0)$, 可以设想,对于固定的接收点 $P(x_0, y_0, z_0)$, 值 $u(x_0, y_0, z_0, t_0)$ 是由波源辐射的球面波叠加得到的。

2. 绕射波时距方程

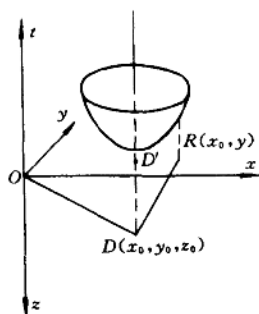


图 1-14 点绕射时距曲面

一段界面上的反射波可以看成由界面上许多面元产生的绕射波叠加的结果。因此,地下一绕射点,在地面许多点观测,所得点绕射时距图用图 1-14 表示。设绕射点 D 的坐标是 (x_0, y_0, z_0) ; D 点以上的速度为 v , 且介质均匀,激发点坐标为 O , 接收点 R 在地面上的坐标是 (x, y) 。则绕射点由 O 经绕射点 D 到接收点 R 的旅行时 t 为

$$t = \frac{1}{v} \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2} + \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z_0^2} \quad (1-2)$$

其中第一项是常数, $t_1 = OD/v$ 。图 1-14 中的时距曲面是旋转双曲面,极小点位于 (D', t_1) , D' 是 D 点在地面的投影。

对于二维地震来讲,时距方程为双曲线。

二、射线理论(几何地震学)

几何地震学是通过研究波前和射线的形态来观察地震波的

传播过程。这种研究建立在高频率即波长非常小的假设之下。在实际地质体中介质波长是相当大的,地震脉冲延续时间会影响到一定的范围,因此当反射层相距较近,比如在 $\sqrt{H\lambda}$ 之内时, H 为界面深度,反射波系列具有相当复杂的情形,尤其是构造复杂的地区,用单纯的

几何地震学研究就很难得出正确的解释。但是对于反射层距离较远,形成的波互不干涉的情况,则可以通过研究某一固定相位来研究反射波的传播,即到达时间和旅行路径的关系(常称为时距曲线),来研究地下地质结构的形态。因此,多年来射线理论在实用中有重要位置。射线理论是以惠更斯原理、费马原理和波阻抗分界面上反射、折射定律为理论基础的。

1. 惠更斯原理

从运动学角度看,惠更斯原理是当已知任何的空间速度分布为 $v(x, y, z)$ 时,根据 t_0 时刻的波前位置,可以得出下一个时刻 t 的波前位置。其原理用解析式描述为

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial z}\right)^2 = \frac{1}{v^2(x, y, z)} \quad (1-3)$$

式(1-3)称为时间场微分方程。满足这个方程和它的边界与初始条件的函数 $t(x, y, z)$ 就是时间场函数,当 t 为常量时,就是波前面的空间位置。

2. 费马原理

费马原理即“时间最小”原理。波从一点到另外一点的传播是沿着最小时间的路径走的,这个路径就是射线,它垂直于运动的波前面。数学表达为沿着某个曲线 L 求解泛函数的极值问题,即

$$t = \int \frac{ds}{v(x, y, z)}$$

在三维的情况下,用下式描述

$$t = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\sqrt{[1 + x'(z)]^2 + [y'(z)]^2}}{v(x, y, z)} dz = \int_{z_1}^{z_2} f(x, y, z, x', y') dz \quad (1-4)$$

式中 x', y' —— x, y 对 z 的导数。

三、波阻抗分界面上反射与折射

地震射线在遇到波阻抗分界面时将产生反射和折射。在均匀介质情况下,符合入射线、反射线和折射线位于入射线的同一法向平面内;入射角 α 、折射角 β 和反射角 γ 遵循斯奈尔定律,即

$$\frac{\sin \alpha_p}{v_{p1}} = \frac{\sin \beta_p}{v_{p2}} = \frac{\sin \beta_s}{v_{s2}} = \frac{\sin \gamma_p}{v_{s1}} = \frac{\sin \gamma_s}{v_{s1}} = \frac{\sin \alpha_s}{v_{s1}} \quad (1-5)$$

式中 v_p, v_s ——纵波和横波速度, m/s;

1, 2 ——表示分界面上、下介质;

P ——表示纵波;

S ——表示横波。

波阻抗分界面上反射与折射波的形成及相互关系见图 1-15。

折射规律为

$$\sin \alpha = \frac{v_1}{v_2} \sin \beta = n \sin \beta$$

当 $\beta = 90^\circ$ 时,分界面上产生首波,这时

$$\sin \alpha = \sin i_0 = \frac{v_1}{v_2}$$

式中 i_0 ——临界角。

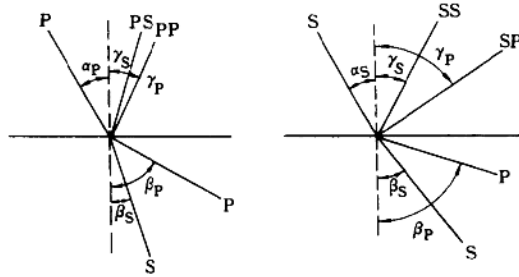


图 1-15 分界面上反射波、折射波的形成

a—纵波入射时；b—横波入射时

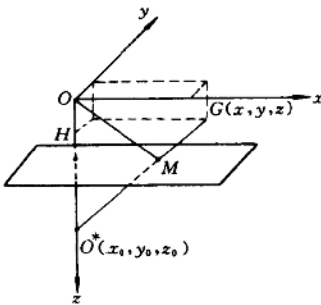


图 1-16 水平界面的反射波

四、层状介质中反射波时距关系

煤田采区三维地震勘探中，常用均匀介质和水平层状介质研究时距关系图。

1. 均匀介质

如图 1-16 所示，只有一个界面的均匀介质，它的反射波时间场可用虚震源的透过波表示。设 (x_0, y_0, z_0) 为虚震源 O^* 的坐标，时间场可表示为

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = v^2 t^2 \quad (1-6)$$

式中 v ——介质速度。

若虚震源 O^* 在 $(0, 0, 2H)$ 位置上，观测时间场，则时距图表达式为

$$t = \frac{1}{v} \sqrt{x^2 + y^2 + [z(x, y) - 2H]^2} \quad (1-7)$$

在地面上观测时， $z=0$ ，则其时距图表达式为

$$t = \frac{1}{v} \sqrt{x^2 + y^2 + 4H^2}$$

如果震源在 $A(x_1, y_1, z_1)$ 点，检波点位于 $B(x_2, y_2, z_2)$ ，它们的时距图表达式为

$$t = \frac{1}{v} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_1 + z_2 - 2H)^2} \quad (1-8)$$

若在空间上有两个面 $z=z_1(x_1, y_1)$ 和 $z=z_2(x_2, y_2)$ 分别为震源面和检波器接收面，它们的时距图可表示为

$$t = \frac{1}{v} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + [z(x_1, y_1) + z(x_2, y_2) - 2H]^2} \quad (1-9)$$