

SHANDONG MEIKUANG CAIQU WUTAN

# 山东煤矿采区物探

## 煤矿采区地震勘探

王怀洪 王秀东 编著

MEIKUANG CAIQU DIZHEN KANTAN

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

山东煤矿采区物探

# 煤矿采区地震勘探

王怀洪 王秀东 编著

中国矿业大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

山东煤矿采区物探:煤矿采区地震勘探/王怀洪,王秀东编著. — 徐州:中国矿业大学出版社, 2003. 7

ISBN 7-81070-735-3

I. 山… II. ①王…②王… III. 煤矿开采—采区—地震勘探—山东省 IV. P618. 110. 8

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第039899号

书 名 山东煤矿采区物探:煤矿采区地震勘探  
编 著 王怀洪 王秀东  
责任编辑 何 戈  
责任校对 张海平  
出版发行 中国矿业大学出版社  
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
排 版 中国矿业大学出版社排版中心  
印 刷 中国矿业大学印刷厂  
经 销 新华书店  
开 本 787×1092 1/16 本册印张 11.5 本册字数 283 千字  
版次印次 2003年7月第1版 2003年7月第1次印刷  
印 数 1~1000册  
总 定 价 68.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

煤田物探在煤炭资源勘探和开发中发挥了极其重要的作用。尤其是自 20 世纪 80 年代中期引进数字地震仪以来,煤田地震勘探有了突飞猛进的发展,其解决地质问题的精度和可靠性是其他方法和手段无法比拟的,已成为煤矿高产、高效安全生产地质保障体系中不可替代的重要勘探手段。

山东煤炭资源丰富,地震地质条件较为优越,是煤田地震勘探应用早、投入工作量最多、技术应用效果最好的地区。

山东煤田物测队自在泰安建队以来走过了 30 年的致力于煤田物探的风雨历程,在从“光电”、“模拟”到“数字”地震勘探的几十年探索中,积累了丰富的研究成果、工作经验和大量有代表性的典型地震资料,但至今没有一套能够反映出山东煤田地震勘探基本面貌的材料。系统地搜集、整理和总结研究这些资料对发展地震勘探技术,使之更好地为煤炭生产服务具有重要意义。

本书兼具探索性和史料性,是我们打开了解山东煤田地震勘探窗口的一次尝试。

适逢山东地球物理学会成立,这是山东地球物理事业发展的新起点,也是山东地球物理工作者工作和学习的一件大事,以此书作为山东煤田物探工作者的献礼。

由于地震勘探方法的间接性;随着技术的发展,分析手段的提高,对资料的认识在不断深入;另外部分资料未得到验证,加上作者能力所限,存在不足和遗漏在所难免,敬请读者批评指正。本书第六章是典型地震资料图析,以图为主,故其版式与其他各章不一致。

山东煤田地质局于克君副局长、物测队的两位前任总工程师张威教授级高工、杨奎应用研究员以及中国矿业大学的崔若飞教授,给予了巨大的支持和帮助,物测队的丁长欣、刘天仁、刘恩兰、郁万彩、许崇宝、张宝水、李庆珍、王宝贵、王红娟、郭联合、王松杰、孙卫东等同志参加了本书部分资料的搜集整理工作。谨向以上同志表示衷心的感谢。

作者

2003 年 6 月

# 目 录

绪论	1
第一章 地震探测技术	5
第一节 检波器的选用	5
第二节 可控震源参数选择	7
第三节 激发方向的选择	10
第四节 几种常见束状三维观测系统分析	11
第五节 宽方位三维观测系统设计	13
第六节 三维地震特殊观测系统的设计及应用	14
第七节 北皂煤矿海上地震勘探技术	17
第二章 构造分析与解释	20
第一节 提高信噪比的常规精细数据处理方法	20
第二节 地震资料的偏移效果	22
第三节 多参数构造解释的应用效果	25
第四节 模糊概率法检测小断层	28
第五节 利用正演模拟技术识别断层解释中的假象	30
第六节 东滩异常地质构造的探测与分析	32
第三章 岩性研究	37
第一节 煤层与其地震反射波动力学参数的相关性	37
第二节 地震—测井联合物性参数反演技术及在煤炭岩性勘探中的应用	41
第三节 煤层宏观结构综合解释	45
第四节 袁堂断层及其奥灰充水性研究	51
第五节 利用地震资料分析第四系含、隔水层	52
第四章 综合物探	55
第一节 垂直地震剖面(VSP)技术	55
第二节 应用微地震技术确定煤层开采的“两带”高度	59
第三节 综合物探技术在地质保障系统中的应用	61
第四节 综合物探技术在矿井水文地质勘探中的应用	63
第五节 地震勘探技术在石膏矿开发中的应用	65

第六节	济宁三号煤矿地震技术应用效果 .....	67
第七节	兖州矿区采区地震应用评价 .....	70
<b>第五章</b>	<b>建设与探索 .....</b>	<b>73</b>
第一节	形势与对策 .....	73
第二节	煤田物探集团化发展 .....	78
第三节	颍广采区地震勘探技术 .....	85
第四节	数字地震与综合勘探 .....	93
第五节	走精确探测的道路 .....	98
第六节	发展是根本出路.....	104
<b>第六章</b>	<b>典型地震资料图析.....</b>	<b>109</b>
一、	代表各煤田的典型时间剖面 .....	110
二、	各种地质构造现象在地震时间剖面上的显示 .....	127
三、	岩性解释 .....	150
四、	解释中的假象(也称解释陷阱) .....	160
五、	其他 .....	163

# 绪论

## 一、引言

我国东部地区除部分第三纪、侏罗纪煤田外,大部分为石炭二叠纪隐伏煤田。煤系地层多数为数十至数百米的新生代地层所覆盖,含煤层数较多,主要可采煤层稳定,煤厚一般在1~10 m。大部分地区构造中常、地表平坦、潜水位较浅,具有较好的深、浅层地震地质条件。普遍发育两组以上优势反射波。目的层追踪深度多在-800 m以浅。它为解决煤矿采区小构造及煤层(岩性)地质任务提供了地质、地球物理基础。

## 二、几个概念

### (一) 薄煤层的检测和小断层分辨

#### 1. 薄煤层的检测

Widess 给出了一个可分辨岩层厚度公式: $h = \lambda/12.6$ 。它与分辨煤系地层中邻近地层多种地球物理和地质因素综合效应形成的薄煤层复合反射波是有区别的。在地震时间剖面上,只有当薄煤层反射波与围岩中较强反射波振幅相当或接近时,此煤层反射波才可被检测出。检测薄煤层极限厚度  $H_m$  为:

$$H_m = \frac{\lambda}{2\pi} \arcsin \frac{(1 - \gamma^2)\gamma_s}{2\gamma(1 - \gamma_s^2)^{1/2}} \quad (\gamma > \gamma_s)$$

煤系地层中: $\gamma_s = 0.2$ ;  $\gamma = 0.5$ , 则  $H_m = \lambda/40$ 。取  $v_{\text{煤}} = 2000 \text{ m/s}$ ,  $f = 60 \text{ Hz}$ , 即 1 m 左右的薄煤层可以在时间剖面上形成反射波。这就是薄煤层可被检测的新定义。它为检测薄煤层提供了理论依据。

#### 2. 小断层分辨

对小断层的分辨力与通常所说的分辨率概念既有联系又有区别。它们都取决于地震探测波长(频率)、频带宽度和形状。而区别在于:分辨率是指纵向探测单层厚度(垂直分辨)和横向发现地质体宽度(水平分辨)的能力。而断层分辨的主要依据是识别相邻地震道几乎同一时刻波形的变化(时差及其他动力学特征参数)。究竟能识别多小的断层,应考虑如下条件:

(1) 对于二维地震,在时间剖面上断点落差为  $\lambda/4$  即  $T/2$  时,能可靠分辨。落差为  $\lambda/8$  即  $T/4$  时也有较为清晰的显示。查明 10 m 以上的断点是有把握的,在物性条件好的地区查明 5~10 m 断点是可能的(取煤系地层反射波的平均速度为 3 000~3 600 m/s,煤层反射波主频 60~80 Hz,时间剖面信噪比大于 2,噪声影响很小)。

(2) 断点分辨力与反射波传播速度( $v$ )成反比,在主频  $f$  一定时,分辨能力随  $v$  的增大而降低,但随着  $f$  的增高, $v$  的影响越来越小。

(3) 煤层埋藏深度增加,断点分辨力降低。

(4) 断点分辨力与噪声水平和采样率密切相关。

## （二）小断层的查明程度

小断层查明程度的基础是时间剖面(单条测线)断点分辨力。也就是说测线上解释的断点必须可靠,同时还与测网密度、断层落差、延展长度的比值有关。

(1) 测网布置应视采区断层复杂程度,遵循实事求是的原则来确定。施工中先疏后密、循序渐进,对通过先期施工后发现的断点,有针对性地布设下期工程,或使用机动工程加密控制。不能不分层次地一个测网采用“梳篦战术”一气呵成,否则会造成经济技术不合理。

(2) 若小断层落差与延展长度比值不同,则测网查明程度也不同。为查明差长比值大(延展长度小)的断层就应有比较密的测网控制。

(3) 二维高分辨率地震勘探的局限性。

在构造复杂的采区,只有三维地震勘探才能提供更精确可靠的地质资料。如宁阳煤田石桥井田,中小断层密集,并存在着由于层滑构造引起的缓倾角断层,切割关系复杂,二维解释成果很难满足采区布置要求。经三维勘探,近 $1\text{ km}^2$ 内查明中小断层40条。同一煤田茅庄矿区 $2\text{ km}^2$ 三维区内查明断层52条。

由于二维勘探本身是线观测,获得的资料是二维剖面,它只能在测线上对反射点进行解释,在平面上具有近似性和推断性,而且不能对复杂的断层准确地进行空间归位。三维是面观测,获得的三维数据体更接近地质体实际。由于三维资料可有多种灵活显示,对平面上任一点地下反射点进行解释,其结果更精确。获得数据量大、信息丰富的高密度数据体,使相邻线相关性增强,细致反映断层、断面、褶曲、煤层冲刷、剥蚀、分叉、合并和尖灭等地质现象,大大提高了分辨率。空间归位后,地质体成像准确,消除了各种干扰,相应提高了信噪比。人机联作对精细层位对比追踪,用垂直时间剖面和水平切片对小断点进行可靠组合,而计算机自动成图则提高了效率。加快推广三维地震勘探是非常必要的。

## 三、技术方法

### （一）资料采集

资料采集是高分辨地震勘探的基础工作,一些文献已有详细论述,并总结出“四小”(小道距、小组合基距、小偏移距、适当小药量)、“四高”(高频检波器、高宽带接收、高时间采样率、高速成型炸药)采集原则。这里特别强调几点:

(1) 潜水位状况调查。用微测井方法选取最佳激发层位,作出平面图,以指导野外生产。激发中不仅要选取最佳深度、岩性,还必须注意要在层速度高的岩层中激发,以提高高频成分的能量。在保证单张记录有足够信噪比的前提下考虑分辨率原则来选取药量。

(2) 模数转换之前,适当提高低截频率和陡度,对浅层低频干扰波,特别是面波进行压制,尤其是对埋藏较浅的反射层追踪更为重要,它能在一定程度上扩展频带,也使较弱高频成分保留下来。当然,也应考虑与检波器特性(包括组合特性)相匹配。在勘探浅部煤层时,尤其应当注意。

(3) 改善检波器与地面耦合的条件。当检波器类型和组合形式确定后,其滤波特性即可知。而地表耕作层与检波器耦合形成的振动系统,或称机械滤波器,其滤波特性是可以控制的。避开耕作层,挖坑埋置检波器和加长尾椎是扩展频带、减少干扰的有效办法。

(4) 检波器本身的特性也影响资料采集的质量,应该选择振幅特性尽量平直(频带宽)、灵敏度高的检波器。在兼顾信噪比和分辨率的情况下,宜使用 $100\text{ Hz}$ 速度型数字检波器。



## (二) 资料“三高”处理

为保证煤矿采区工作面的合理布置与生产,提高分辨小构造的能力,不仅要求野外资料采集高质量,而且要精细处理,达到高信噪比、高分辨率、高保真度(三高)。尽管资料采集后,信号频带是不能展宽的,即高、低截频点都不能分别向低频和高端移动,但去噪后都提高了单一频率分量信噪比,而不使信号频带变窄,使有效波频带得到展宽,从而提高信噪比和分辨率。处理达到“三高”目标的研究有了一定进展。其主要特点是:强化叠前处理、使用分频手段、速度分析与剩余静校多次迭代、合理搭配模块。目前应重视采区地质模型反演,并与钻孔和井巷揭露的资料进行对比,然后修改模型参数和处理参数,并经过多次正、反演迭代运算给出最终地质模型,总结出一套适应采区地质任务要求的处理方法。处理人员应熟悉采区地质情况,有针对性地做好每一步参数分析和质量控制。在突出主要目的层反射波的同时,注意弱反射波信噪比的改善,为断层产状解释提供充分依据。

## (三) 资料解释

### 1. 速度

地震波速度在地下的变化是采区地震处理和解释的基础,因此,速度成为解释过程的关键。据许多用户反馈信息,个别采区地震解释结果与钻孔及井巷揭露的煤层底板深度及断层落差、平面位置摆动误差较大,除资料采集方法不当、施工质量差,静校正、偏移处理不当外,主要是速度选取精度不高及空间速度场建立与实际有较大差别。目前采区地震勘探中利用钻孔或井巷已知目的层深度,确定与其对应的有效波,反算该点的速度值已完全满足精度要求。但在矿井的扩大延伸采区或地方煤矿,由于原地质工作程度低,钻孔稀少,很难准确计算速度场并进行各层时深转换。那么就要认真总结各种速度资料,有条件的采区在钻孔中进行VSP观测,以获得精确的速度资料。

### 2. 解释

资料解释是将时间剖面或三维数据体转变成地质术语。解释的质量与每个解释人员的能力、认真程度及想像力有关。

首先,吃透区域和采区地质资料,掌握各种地质模型在地震资料中的表现,解释的结果应符合采区地质规律。再者,必须充分利用钻井、测井及其他物探资料进行综合解释。注意断层解释的陷阱,如:地层产状突变、褶曲形成回转波偏移收敛不好、煤层上覆地层或反射层本身岩性变化等造成假断层。

对三维资料解释成果(数据体),有条件的矿务局和矿应装入用户工作站,采矿技术人员一方面用它来指导生产,另一方面将井巷或采区揭露的构造、煤层等数据与勘查单位提供的资料进行对比,不断修改完善整个数据体。

## 四、问题探讨

### (一) 推广三维地震勘探,增大勘探面积

三维高分辨地震勘探只能为采区划分提供依据,而对于采区开拓目前还没有其他方法比三维地震勘探更能提供精确的地质资料,这已为许多采区的三维资料所证实。但现在采区三维施工面积太小,许多工程用于“镶边”,使勘探费用增高,限制了它的推广。适当增加三维勘探面积,对今后采区开拓是非常经济合理的。

## (二) 做好静校正和偏移处理

野外必须有足够且分布均匀的微测井或小折射资料,对炮点和检波点进行高程测量,以建立近地表模型,进行静校正,将静校误差降到最低。

水平叠加剖面对较小地质异常、小断层有模糊作用。目前采用叠后偏移或叠前部分偏移(DMO)都收到了较好的效果。由于并行计算机的出现、叠前偏移成像理论的发展、配套软件的完善和速度函数分析的日趋准确,使得实现叠前偏移成为可能。不论哪种偏移,都取决于速度选取精度,资料处理时应认真对待。

## (三) 研究非构造因素信息,提高岩性勘探水平

我们不仅要区分构造和非构造信息,正确解释地质异常,而且要研究非构造信息,如煤层分叉、合并、缺失、单层及多层煤厚、断层导水性、煤层盖层含、隔水性等,以便为综采减少风险及损失。目前,从时间剖面反演煤层厚度的方法很多,有的已在采区得到应用,但它们都限制在煤层小于 $1/4$ 波长条件下,对中厚煤层及多层煤还有一定局限性。更重要的是从量的角度很难完全消除非煤厚影响因素。完善和提高岩性勘探技术,进一步提高解释精度成为当务之急。除此之外,加强综合物探(数字电法、高精度重磁、矿井物探等)研究,针对不同地质任务,采取综合手段,更好地解决采区面临的地质任务。

## (四) 加强探采对比,尽快总结出一套采区物探方法

各物探队应对所做过的采区地震进行调研,广泛听取用户意见,这是提高技术水平的重要举措。在总结成功经验的基础上,要特别认真总结失败的例子,找出原因。对当前技术上达不到,而采矿部门迫切要求解决的地质任务及提高精度的要求,要组织攻关,在技术上突破。

要针对复杂地表,如丘陵、山区、沼泽、丛林、沙漠、村庄,开展方法研究,提高采区地震勘探的适应性,扩大应用范围,开拓新的市场,并总结出一套适应我国煤矿采区物探的技术方法,更好地为煤矿建设和生产服务。

# 第一章 地震探测技术

## 第一节 检波器的选用

近几年来,物探工作者都在努力寻求和探索可能进一步提高勘探精度的方法和途径。其中主要途径有:引进 24 位模/数转换、高采样率多道的数字地震仪;采用相应的资料处理软件如折射静校正、偏移等;开展多波勘探和高密度三维勘探;选用高精度检波器及其组合;使用解释工作站进行人机交互解释;进行必要的正反演模拟;等等。

在资料采集中如何选用检波器及采用何种组合是个值得重视的问题。

### 一、检波器的工作原理及其特性

陆地普遍采用速度检波器,当受到力作用后,惯性体( $M$ )线圈即相对于外壳(或磁缸)运动,线圈两端即产生电动势  $E = \omega \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\phi}{dx} \frac{dx}{dt}$ 。

其中:  $\omega \frac{d\phi}{dt} = C_m/e$ ,  $C_m/e$  为机电转换系数,  $\omega \frac{dx}{dt} = \dot{x}$  为惯性体位移的速度。

检波器的外力作用后的固有振动的微分方程为:

$$x''M + \left( h + \frac{C_m^2/e}{Z_e} \right) x - xk = 0 \quad (1-1)$$

$x$  为线圈惯性体的位移;  $M$  为惯性体的质量;  $k$  为弹簧片的弹性系数;  $C_m/e$  为检波器的机电转换系数;  $Z_e$  为检波器的负载(包含内阻);  $h$  为检波器的阻尼系数。

把式(1-1)写为:

$$x'' + x' + \frac{\left( h + \frac{C_m^2/e}{Z_e} \right)}{M} x + x \frac{k}{M} = 0$$

又根据  $v'' + 2hv' + n_0^2v = 0$  的特征方程假设为:

$$\alpha^2 + 2h\alpha + n_0^2 = 0 \quad (1-2)$$

则方程的两个根为:

$$\alpha_1 = -h + \sqrt{h^2 + n_0^2}; \alpha_2 = -h - \sqrt{h^2 + n_0^2}。$$

当  $h \neq n_0$  时,方程无重复根,则按式(1-2)确定的固有振动如下:

$$v(t) = e^{-ht} \left[ C_1 e^{\sqrt{h^2 - n_0^2} t} + C_2 e^{\sqrt{h^2 + n_0^2} t} \right] \quad (1-3)$$

以下分三种情况讨论这个固有振动方程。

当  $h < n_0$  时,则式(1-3)可写为:

$$\begin{aligned} v &= e^{-ht} (C_1 \sin nt + C_2 \cos nt) \\ &= e^{-ht} C \sin(nt + C_3) \end{aligned} \quad (1-4)$$

$C_1, C_2, C_3$  为任意常数, 它是由振幅和相位来确定的。 $h$  为检波器的阻尼系数。可见式(1-4)所表达的是一周期性的正弦衰减振动。

当  $h > n_0$  时, 则式(1-3)为:

$$v = e^{-nt} (C_1 e^{nt} + C_2 e^{-nt}) \quad (1-5)$$

其中:  $n = \sqrt{h^2 - n_0^2}$

式(1-5)为一非周期性固有振动, 并且振动快速衰减。

当  $h = n_0$  时, 则式(1-3)为:

$$v = e^{-h t} (C_1 + C_2 t) \quad (1-6)$$

式(1-6)所表示的也是非周期性的固有振动, 此时的阻尼称为临界阻尼。

由以上讨论可知, 检波器的固有振动形态与参数  $h$  (阻尼系数) 和  $n_0$  (自然圆频率) 的比值有关。

当  $h/n_0 \geq 1$  时, 为非周期性振动, 并快速衰减。

当  $h/n_0 < 1$  时, 为周期性固有振动。固有振动的延续时间随这个比值的减小而增加。

当  $h/n_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}$  时为最佳阻尼。可用频谱分析的方法求得, 此时的延续时间  $\Delta t = 1.63 \frac{T_0}{2\pi} \approx 0.26 T$ 。

由以上分析可知, 为了使检波器有足够大的分辨能力, 必须使检波器有足够的阻尼。检波器的阻尼一般都选在  $\frac{n_0}{\sqrt{2}} < h < n_0$  范围内, 即在最佳阻尼和临界阻尼之间。

## 二、不同连接方式的多个检波器组合对灵敏度和阻尼的影响

单个检波器在出厂时已充分考虑到对分辨率最有利的参数, 但在野外进行多个检波器组合时, 不同的连接方式对检波器组的灵敏度和阻尼参数都将产生明显的影响。因而在野外进行多个检波器组合检波时, 组合形式、连接方式对记录品质都会产生影响。

由检波器的灵敏度公式:

$$a = R_Z C_m / e = R_Z \omega \frac{d\phi}{dx} \quad (1-7)$$

$R_Z$  为检波器回路总阻抗, 决定检波器灵敏度的主要因素是它的机电耦合系数, 由式(1-7)可知, 在检波器磁通量不变的情况下, 线圈的匝数  $\omega$  又决定了检波器的灵敏度。

检波器的阻尼系数  $h$  由惯性体质量  $M$ 、机电耦合系数  $C_m/e$ 、回路阻抗  $Z_c$  及检波器的“机械阻尼” $H$  (它是由检波器内部嵌入的阻尼电阻所决定的) 等多个因素决定。则:

$$h = \frac{1}{2M} \left( H + \frac{C_m/e}{Z_c} \right) \quad (1-8)$$

从公式(1-7)和(1-8)可以看出: 检波器串联后灵敏度会明显增加(近似于相加的关系), 阻尼会有所减小(回路总阻抗增大)。检波器并联后, 灵敏度基本不变, 但阻尼会明显变大(回路总阻抗减小)。因此在生产实践中多个检波器组合检波时, 检波器的连接方式是一个很值得注意的问题。

20 世纪五六十年代, 仪器动态范围仅为 20~40 dB, 为提高地震记录的信噪比, 主要选用多检波器组合的手段。由于缺少计算机处理手段, 仅用野外的监视记录作对比解释的资料, 因而, 信噪比在当时的地震记录中是最主要的矛盾, 组合检波在压制干扰方面有着突出

的效果,延续至今仍被普遍采用。但组合检波将产生平均或低频效应,不可避免地会大大降低资料的分辨率,对采区勘探是有害而无利的。

当代地震勘探中的多次覆盖和处理软件的多样性,使得压制干扰、提高信噪比的方法和手段很多。数据采集中的组合检波已不再是压制干扰的主要方法,它完全可以让位于提高分辨率这一要点。

理论上,单个检波器接收应最有利于提高分辨率,但试验结果表明,用2~6个检波器采用合适的连接方式在效果上优于单个检波器。

采用少量(2~6个)检波器蹲点组合检波对分辨率的提高确有好处,但如果不注意检波器的连接方式也同样得不到最佳的效果。

检波器全部采用串联,看起来灵敏度提高很大,但阻尼有所减小,其抗干扰性和分辨率都降低。目前有些工区盲目采用3个检波器串联蹲点组合检波,显然是不甚合理的。在非特殊情况下,采用混联,即串、并结合,如3串3并、2串2并等,使组合后的检波器组的总的灵敏度不变,这样有利于在一般情况下取得好的原始资料。

### 三、PS—60A 复式检波器的性能

煤田勘探要求检波器必须是高阻尼的。

在检波器的设计时,灵敏度和阻尼是相互矛盾的,也就是说,在保证高灵敏度时,就不能保证高阻尼。一般而言,单只检波器保证高灵敏度时,很难保证检波器阻尼在0.60以上。

由于高性能磁性新材料的利用,PS—60A特种检波器的灵敏度是 $55 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s})$ (20 C测试,以下同),阻尼是0.65,而普通检波器的灵敏度为 $20 \sim 30 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ,所以,单只PS—60A特种检波器相当于2只普通检波器串联的效果,既保证了高灵敏度,又保证了高阻尼,从而保证了浅层勘探的分辨率。

PS—60A特种检波器的线圈是上下切割磁力线圈,而且它围绕磁性系统可以做旋转运动。也就是说,在不同频率信号激振下,线圈总是呆在它最合适的位置,这种结构大大降低了检波器的失真度。

经过分析和调研,我们采用PS—60A特种检波器的2串2并组合,型号为VS4,钢结构外部封装,单串灵敏度 $110 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ,阻尼是0.65,出线15 m,外挂钢丝绳。VS4串中的4只检波器接受振动信号是同步的,没有延时,从而使信号相位保持一致。这种检波器串既能在陆地和沼泽使用,又能在浅水(水深不超过12 m)施工中使用。

当在陆地施工时,采用下井式工作方式,在地面挖坑埋置,这样,既能减少因地面风吹带来的干扰,又能屏蔽空间的杂散电磁波的干扰,从而保证信号的真实性。

经过几个工区的施工,证明VS4检波器具有高灵敏度、高阻尼、高保真特性,满足煤田高分辨勘探的要求,特别适用于在相邻高差较大的丘陵地区和水网、沼泽地带施工。

## 第二节 可控震源参数选择

近年来,地震勘探技术在煤矿生产中得到了广泛应用,因此,怎样提高地震资料的分辨能力已倍受煤田地质工作者关注,其中地震信号的激发和采集被认为是首先需要解决的问题。在一些地震地质条件非常复杂的地区,当人工甚至机械方法也难以成孔时,可控震源替

代炸药震源应是首选的方法。可控震源在山东宁汶、莱芜找煤等项目中的应用表明:震源参数选择的合理与否对于获取高质量的地震资料至关重要。

## 一、可控震源的工作原理

可控震源系统由数字信号发生器(DPG)和数字伺服驱动器(DSD)组成,它们分别安装在仪器车和震源车上。DPG的作用是产生用于相关的参数扫描信号,寄存操作员输入的扫描参数,对DSD发出统一的振动命令,从DSD得到实时监测结果并将结果存档。DSD的作用是从DPG得到并存储扫描选择、扫描参数和工作命令,控制重锤和平板运动,使地面力信号的相位和畸变误差量小,计算实时质量控制结果并发送到DPG。

可控震源系统的野外工作方法在许多方面与炸药震源基本一致,二者的差别在于采用可控震源时需要进行大量的组合、叠加,即同时使用几台震源,以一定的组合形式,在一个振点(即炮点)上振动几次至几十次;每次振动后各台震源保持其组合形式不变,向同一方面移动一定距离后,再振动第二次,依此类推。野外记录就是上述许多次振动叠加,经相关后得到的结果。

可控震源在地震勘探中适用于潜水位较深、浅部砾石层较厚、人工甚至机械方法难以成孔的地区。这一方法具有施工效率高、成本低、激发频率和振幅可以控制等特点。

## 二、可控震源参数的选择

可控震源参数有扫描频宽、扫描时间、扫描方式、震源台次和组合方式三种。

### (一) 扫描频宽( $f_L, f_H$ )及镶边方式

扫描频宽和镶边方式是影响地震资料信噪比和分辨率的重要参数。可控震源激发所获得的资料是相关后的原始记录,其质量与相关子波密切相关。考查相关子波优劣的因素有清晰度、分辨率、延续时间和旁瓣大小。

(1) 清晰度是相关子波最大波峰值与相邻波峰值之比,即  $A_1/A_2$ 。保证两个倍频程(oct)的扫描频宽,亦即  $f_H/f_L \geq 2 \text{ oct}$  ( $f_H, f_L$  分别为扫描频率的高截值和低截值),就可以获得较好清晰度的相关子波,其中低截扫描频率值一般应大于本区主要干扰波和最高频率。

(2) 分辨率是相关子波中主波峰两次跨越零点之间的时间,即  $R$ 。它取决于扫描的中心频率( $f_P$ ),而  $f_P = (f_L + f_H)/2$ ,扫描中心频率越高,相关子波的分辨能力越强。

(3) 延续时间是相关子波主要能量部分的延续度,它取决于扫描的频带宽度( $\Delta f$ ),而  $\Delta f = f_H - f_L$ ,即频带越宽,延续时间越短,记录的信噪比和分辨率越高。

(4) 旁瓣大小是相关子波中心部分以外的幅值大小,它取决于扫描镶边方式。通常采用余弦过渡镶边方式,这样有利于降低相关子波旁瓣幅度,镶边时间一般取 0.5 s。

### (二) 扫描时间(长度)( $t_L$ )

合理的扫描时间能够增强下传地震波能量,提高信噪比。扫描时间的选择应综合考虑以下两个方面:

(1) 满足最大扫描速率,即  $t_L \geq (|f_H - f_L|)/K$  ( $K$  为可控震源所限定的最大扫描速率值,它被震源液压伺服系统所限定)。

(2) 避免相关虚像对记录质量的影响。可控震源在振动过程中,除了产生所需要的扫描振动信号外,还伴随有二次和更高次的谐波信号,若谐波频率与基本扫描频率有重叠,将在

记录中产生虚像。就可控震源扫描振动信号而言,通常要求相关虚像出现的时间不在有效记录范围之内,使它对勘探目的层的反射影响最小。

在考虑到优势信噪比的同时,为了避免相关虚像对记录质量的影响,一般应优先选择长扫描,以降低垂直叠加次数。采用长扫描有如下优点:

(1) 长扫描的效率高,至少可以节约两次振动之间的等待时间。

(2) 由于低频激振信号的畸变不容易解决,且具有不确定特点,故垂直叠加次数愈多,相关子波的叠加效果愈差,而采用长扫描,降低垂直叠加次数可改进叠加质量。

(3) 采用长扫描可以避开干扰波对主要目的层的影响。

(4) 采用长扫描可以改善信噪比。

### (三) 扫描方式(升、降频)

扫描方式有升频和降频两种,由于二次谐波往往出现在降频采集记录中,影响记录质量,所以在施工中通常使用升频扫描。

### (四) 震源台次及组合方式的选择

使用多台震源是加强向地下发射扫描信号能量的重要手段,它既是单台震源受出力大小限制的一种补救措施,也是避免单台震源出力太大、能量过多地消耗在地表破碎带、增强对地表干扰波压制效果的手段。值得指出的是,增加台数不能与增加检波器个数相混淆,震源组合压制干扰波的效果可与检波器组合联合考虑。

增加振动次数也是累积地下反射信号能量的一种有效措施,但是增加振动次数对提高信噪比和反射波能量不如增加震源台数的效果明显。

总之,这些震源参数是相互联系的,因此应当根据不同地区和不同的地震地质条件,通过试验对比,在综合考虑设备条件和施工效率的基础上进行选择,以取得最佳的地质效果。

## 三、实例及效果分析

### (一) 地表地质条件

肥城矿务局白庄某测区表层为松散洪积物,地表 13 m 以下有多层砾石粘土层,层厚及层间距不等,且自南而北,砾石层厚度和砾径有增大趋势。该区潜水位约 15~20 m,南浅北深。

### (二) 资料采集及解释

#### 1. 资料采集

本次资料采集是用可控震源进行激发的,其参数如下:

表 1-1 可控震源观测系统及有关参数

仪器观测系统	仪器型号	接收道数	激发方式	偏移距	道距	采样间隔	记录长度
	DFS—V	48	中间	20 m	10 m	1 s	1 s
可控震源参数	震源型号	振动次数	扫描长度	扫描速率	起始频率	振动台次	—
	MZ—18	8	12 s	6 Hz/s	25 Hz	1	—

#### 2. 资料处理解释

资料处理以常规处理为主,尽量少用或不用修饰手段,尽可能消除因非地质原因给地震

资料带来的影响。煤层与上、下围岩在速度、密度方面都存在较大的差异,可以产生较强的反射波。由于 $3_{\text{上}}$ 煤层厚度稳定,约3.6 m,因此产生的反射波在时间剖面上可全区连续追踪,是本区的标准反射波。而 $3_{\text{下}}$ 煤层不稳定,厚度在0.25~1.4 m之间,且与 $3_{\text{上}}$ 煤层的间距小于10 m,因而来自 $3_{\text{上}}$ 、 $3_{\text{下}}$ 煤层的反射波不能区分,接收到的反射波为两煤层的复合反射波。

分析以上实例可以看出,在煤田勘探中利用可控震源可以弥补地震地质条件的不足,获得常规方法难以采集的地震资料,查明地质构造问题,为煤矿生产提供服务。

### 第三节 激发方向的选择

在设计观测系统时,通常认为当地层倾角较小时( $<15^\circ$ )可采用中间发炮,即上、下倾激发都可以,当地层倾角较大时( $>15^\circ$ )必须采用下倾激发。这种认识在施工条件较好的工区,矛盾不是很突出,但在施工条件复杂的工区,受各种地表条件的限制,往往存在大面积不能激发;在不能埋置检波器的地段,必将造成大段空白,使反射波不能连续追踪对比。在复杂地表工区,为了保证观测的连续性,必须采取各种灵活的变观方法,其中包括改变激发方向。因此,研究地层倾斜时上倾激发与下倾激发的异同点是非常重要的。

#### 一、上、下倾激发的理论分析

##### (一) 共炮集记录上的区别

当反射界面倾斜时,共炮集反射波时距曲线为双曲线,其时距曲线方程为:

$$t = (x^2 + 4h^2 \pm 4hx\sin\phi)^{1/2}/v \quad (1-9)$$

式中: $h$ 为零偏移时距界面的法线深度; $\phi$ 为地层倾角,下倾激发时取负号,反之则取正号。

从式(1-9)可得出反射波视速度( $V^*$ ):

$$v^* = \frac{dx}{dt} = \frac{v(x^2 + 4h^2 \pm 4hx\sin\phi)^{1/2}}{x \pm 2h\sin\phi} \quad (1-10)$$

式中正负号选择与式(1-9)相同。

从式(1-10)可以看出上、下倾激发的区别在共炮点集上表现为反射波视速度的不同,下倾激发视速度较高。

##### (二) 共中心点集上的统一

在反射波法地震勘探中最大入射角要小于临界角,根据互换原理,炮检互换后反射波传播路径完全相同,其共中心点反射时间值相等。虽然在共炮点集上反映不同,但在共中心点集上、下倾激发可用同一时距曲线表示,即 $t=1/v(4h_0^2+x^2\cos^2\phi)^{1/2}$ 。式中, $h_0$ 为共中心点界面的法线深度。

因地震波在传播过程中穿过相同的地层,地震子波经过了相同的大地滤波作用,其反射波能量、频率、反射系数稳定性无任何差异。

#### 二、共炮点集视速度差异的应用

当地层倾角较大时,上、下倾激发使共炮点集记录上反射波视速度差异较大,下倾激发时视速度较高,因此与视速度有关的一些采集参数和处理方法也有一定的差异。

##### (一) 保护高频成分方面的差异



在野外数据采集中,检波器组合是一个重要的提高信噪比的手段。为了保护信号的高频成分,要求到达各检波点有效信号的时差足够小,高频成分不致互相抵销,一般应要求各点时差不超过高频成分的半个周期。在组合尺度相同的情况下,较高的反射波视速度可以保护信号的更高频成分。因此在地层有倾角时,下倾激发在同样组合尺度时能保护信号的更高频成分。

通过共炮点集反射波视速度公式可以计算一定组合基距的反射波的频率上限,假如给定组合基距为 10 m,速度为 3 000 m/s,法线深度为 800 m 时,在不同炮检距、不同地层倾角的条件下,计算出激发时信号的频率上限如表 1-2 所示。

表 1-2 不同条件下上倾激发的频率上限

$\phi/(\circ)$	20	20	30	30	40	40
$x/\text{m}$	400	600	400	600	400	600
$f_{\max}/\text{Hz}$	281	247	229	221	197	188

## (二) $f-K$ 滤波方面的差异

在规则干扰较强的地区,二维滤波是一种行之有效的处理手段,而避免出现空间假频,有效波及干扰波的频率与视速度的差异是决定二维滤波效果的重要因素。二维滤波可以在共炮点集、共接收点集、共中心点集和叠加剖面四个域中进行,四个域中道距的大小分别为其相邻数据道的水平间隔。在给定倾角( $\phi$ )、视速度( $v^*$ )和道距( $\Delta x$ )时,不会产生假频的最高频率上限为:

$$f_{\max} = v^* (4\Delta x \sin\phi)$$

在叠前,共炮点集的道距一般是最小的,因此,也是最适合作二维滤波的,为保持相同的频率上限,上倾发炮必须采用相对较小的道距,同时要保证干扰波不出现假频。

在共炮点集记录上,规则干扰波的视速度往往有较低的视速度,如面波;有的与直达波平行或近于平行,如多次反射折射波。下倾激发有效波视速度较高,在  $f-K$  谱上与干扰波差异较大,容易达到比较理想的滤波效果。上倾激发时则由于有效波与干扰波视速度差异小,特别是远道部分,二维滤波效果相对较差。

当地层倾角较大时,不能单纯地因倾角大而只采用下倾激发方式,特别是在复杂条件地区,比较简单的观测系统很难保证有效波的连续追踪,必须根据工区的波场特征,结合具体地质任务,通过试验选择合理的观测系统,采用灵活的变观措施,尽可能地保证观测的连续性。

## 第四节 几种常见束状三维观测系统分析

三维高分辨率地震勘探精度比常规的二维地震勘探大幅度提高,但其技术要求比较高,设计、施工、资料处理和解释各个环节都非常重要,而野外采集第一手原始资料尤为重要。资料采集时运用何种观测系统有多种选择方式,下面选择几种规则三维观测系统(表 1-3),分别就其不同之处进行讨论分析。

在讨论前先假定:设计 CDP 网格,为 10 m(纵向)×10 m(横向);地层倾角近水平;目的