



滩浅海地区 高精度地震勘探技术

李丕龙 宋玉龙 王新红 丁 伟 吕公河 著

石油工业出版社

滩浅海地区高精度地震勘探技术

李丕龙 宋玉龙 王新红 丁 伟 吕公河 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书针对滩浅海地区地震勘探的特点,系统研究了地震勘探采集、地震资料处理、多波多分量勘探等一系列实用技术,并通过在胜利油田部分地区的实际应用,取得了显著效果。书中形成了一套适用于滩浅海地区的高精度地震勘探技术系列,将会对该类地区的勘探技术的发展产生重要影响。

该书可供从事地球物理勘探工作的科研人员和高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

滩浅海地区高精度地震勘探技术/李丕龙等著.

北京:石油工业出版社,2006.11

ISBN 7-5021-5535-X

I. 滩…

II. 李…

III. 浅海-地震勘探

IV. P631.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第050072号

滩浅海地区高精度地震勘探技术

李丕龙 宋玉龙 王新红 丁 伟 吕公河 著

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2006年11月第1版 2006年11月第1次印刷

787×1092毫米 开本: 1/16 印张: 28.25

字数: 720千字 印数: 1—2000册

定价: 120.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

在环渤海湾地区,陆上分布着胜利油田、辽河油田、冀东油田、大港油田,海上也发现了具有远景的大油气田,然而在陆上和海上的大油田间还存在着大面积的滩浅海地区。由于滩浅海地区的复杂地表、表层结构以及地下多种类型的地质条件,加上勘探设备的不适应,使得滩浅海地区的勘探程度较低,地质构造规律和油气富集规律尚待查清,它是尚未充分勘探的最有利地区之一。渤海湾地区滩浅海油气资源潜力巨大,其总面积约为 17594km^2 , 剩余资源量为 $30.11 \times 10^8\text{t}$, 已探明油气储量为 $5.6 \times 10^8\text{t}$, 剩余资源量占总资源量的 84% 。胜利滩浅海地区的油气总资源量约为 $12 \times 10^8\text{t}$, 探明石油地质储量约为 $3.7 \times 10^8\text{t}$, 剩余资源量约占总资源量的 70% 左右,表明滩浅海地区的油气资源开发具有很大潜力。

滩浅海地区的地表条件和表层结构非常复杂,有陆地、沼泽、潮汐带和浅海等,对设备和技术要求很高,因此作业难度高,勘探成本也较高。1972 年以来至今,在总面积为 17594km^2 的滩浅海区域内,只完成二维地震工作量 3300km , 三维地震工作量 3782km^2 , 三维勘探面积占总勘探面积的 21.5% 。胜利油田作为滩浅海勘探程度最高的地区,总勘探面积为 5500km^2 , 目前勘探面积已达 3700km^2 , 其中三维勘探面积为 1588km^2 , 占总勘探面积的 28.9% 。但在 1588km^2 的三维区块中,有大约 800km^2 是较早期施工的三维地震工作量,受当时施工方式和采集技术水平的限制,普遍存在观测系统简单、地震资料信噪比低、剖面质量不高的问题,无法满足地质构造精细解释的需要;剩余的未进行三维地震勘探的地区大都属于地表条件很复杂的地区,施工难度较大,当前亟待在滩浅海地区开展地震采集技术的深入研究。特别是随着对渤海湾地区整体认识的提高,跨越陆地、滩海、浅海和深海地区的勘探需求会不断增加,滩浅海地区的勘探工作还大有可为。

相对于陆地和海洋而言,滩浅海地区的勘探程度较低,对地质构造认识程度较低。难以利用目前取得的陆地和海洋信息对渤海湾地区从整体角度勘探评价,进而也就降低了渤海湾地区的勘探效果和含油气远景的预测能力。

滩浅海地区勘探难度大,已勘探和将进行勘探的地区都十分需要应用高精度地震勘探技术。因此,无论是从油气资源潜力和提高勘探程度的角度,还是从滩浅海勘探重要性的角度来讲,开展滩浅海高精度地震勘探技术研究都具有十分重要的意义。本书系统研究了滩浅海地震勘探问题,为滩浅海提供一套合适的技术系列,这必将为海上浅海勘探和陆上滩海勘探提供重要的技术支撑。

本书针对滩浅海特有的复杂地表和表层结构条件,开展滩浅海地区地震勘

探的激发震源、检波器、野外施工方式和观测系统等野外采集各环节的系统研究,解决在滩浅海地区野外难以采集到高品质地震资料这一制约滩浅海油气发展的关键技术问题;以滩浅海复杂表层结构中地震波场传播理论为基础,开展地震记录上的干扰波压制、近地表校正、高精度叠加和偏移成像技术等方面的深入研究,解决滩浅海地区地震资料处理品质过低和成像精度不足而难以刻画与描述地质目标的问题,形成一整套适用于滩浅海地区油气资源探查的高精度的实用性特色技术,沟通陆上和海上地震勘探信息,为胜利滩浅海地区油气勘探的增储上产提供了可靠的技术保障。

本书共分五章,其中第一章由吕公河、于静编写;第二章由宋玉龙、马国光、吕公河、张光德、刘晋观、刘怀山、徐德惠、李文彬、房师欣编写;第三章由王成礼、牟凤鸣、朱伟强、牛滨华、王华忠、王彦春编写;第四章由丁伟、丁世煊、李录明、于静编写;第五章由王新红、吕公河编写。全书由吕公河、于静统稿,李丕龙、宋玉龙审核。

在本书编写、审订过程中,得到了胜利油田有限公司、胜利石油管理局的大力支持,在此表示感谢。本书难免存在错误和不足之处,欢迎广大读者批评指正!

目 录

第一章 滩浅海地震勘探的特点及存在的问题	1
第一节 滩浅海地区的特点	1
第二节 滩浅海地区地震勘探技术的特点	2
第三节 滩浅海地区地震勘探存在的问题	4
第四节 滩浅海地震勘探问题的解决思路	5
第二章 滩浅海地区地震勘探采集技术	7
第一节 炸药震源激发技术	7
第二节 气枪震源激发技术	33
第三节 新型检波器接收技术	45
第四节 观测系统优化设计技术	52
第五节 表层结构调查技术	69
第六节 干扰波调查技术	99
第七节 施工方式控制	104
第八节 二次定位技术	107
第三章 滩浅海地区地震资料处理技术	135
第一节 近地表校正技术	135
第二节 激发、接收差异校正技术	156
第三节 虚反射和变周期鸣震压制技术	167
第四节 噪音衰减技术	209
第五节 共反射面元高精度叠加技术	222
第六节 高保真成像技术	247
第七节 软件开发	289
第四章 滩浅海地区多波多分量勘探技术	332
第一节 多波多分量采集技术	332
第二节 各向异性多波多分量处理技术	337
第三节 多波资料解释方法研究	378
第五章 滩浅海地区高精度地震勘探技术应用效果及分析	419
第一节 应用效果	419
第二节 结论	435
第三节 应用前景分析	437
参考文献	439

第一章 滩浅海地震勘探的特点及存在的问题

第一节 滩浅海地区的特点

滩浅海地区主要是指从陆地到海洋的整体过渡带，包括滩涂、两栖地带、极浅海地带。滩浅海地区的特殊性主要是与陆地和海洋的情况相比较，体现在涨潮为海、落潮为滩的两栖地表和受多期海进、海退形成的复杂多变的表层结构。

滩浅海地区地表多是由于河湖、海潮淤积形成烂泥带，河沟、海沟冲刷形成的淤泥滩，盐田、虾池星罗棋布，浅海种植养殖成条成带分布，河沟、海沟纵横交错，还有海滩各种植被，另外还有极浅海、浅海水域(图 1-1-1)。

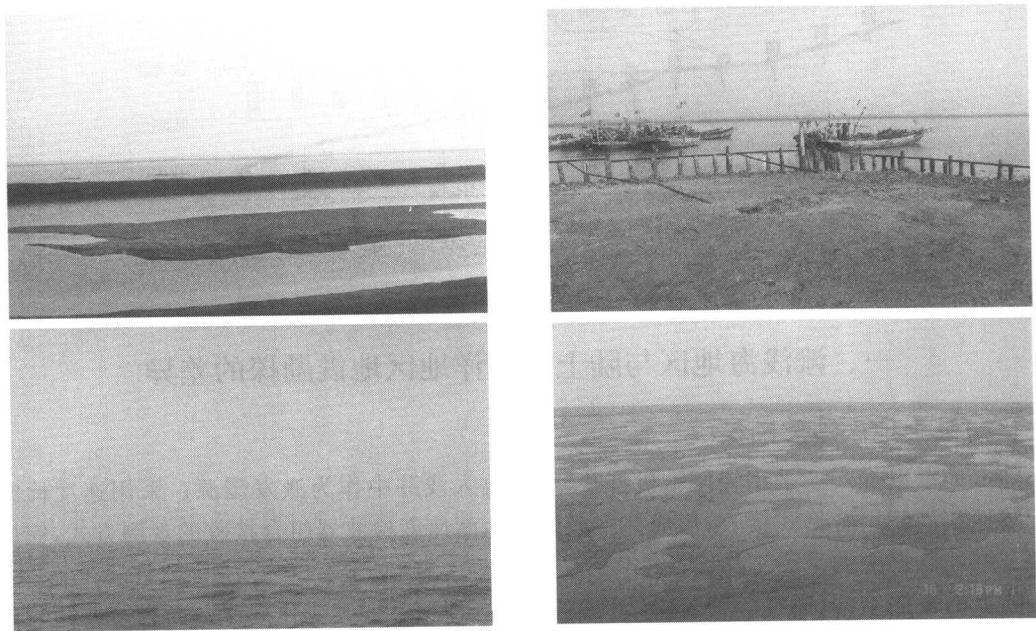


图 1-1-1 典型的滩浅海地表

滩浅海地区表层由河湖入海口处的表层沉积极不稳定、岩性变化快的泥沙、淤泥和海蚌壳薄互层组成(图 1-1-2)。

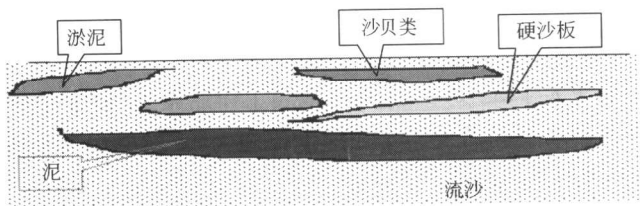


图 1-1-2 滩浅海地区复杂的表层结构

滩浅海地区独特的地表特点和表层结构,导致了滩浅海地区的地震勘探技术有着不同于陆地和海洋的显著特点。

第二节 滩浅海地区地震勘探技术的特点

滩浅海地区的地震勘探技术经历了 40 年的摸索,不断取得进步,但始终不尽如人意。要发展和创新一套新的滩浅海地区地震勘探技术,努力提高滩浅海地区地震勘探技术水平和精度,首先必须要全面地认识滩浅海地区地震勘探技术的特点。

从地震勘探施工环境,既有陆地,又有海滩,还有极浅海,更有随着潮涨潮落造成的两栖区域(图 1-1-1),形成了不同时间水陆交替变化的特殊地表条件。因此,地震勘探需要涵盖陆地、海滩和极浅海的技术方法和设备(图 1-2-1);更为困难的是目前在两栖地带没有很适应的接收和激发技术和设备。

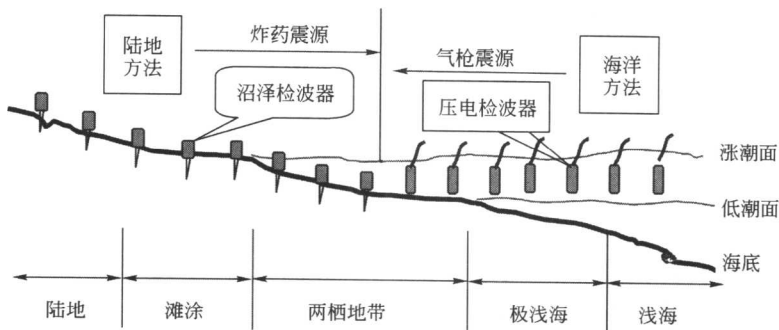


图 1-2-1 海陆两栖地区地震勘探示意图

一、滩浅海地区与陆上、海洋地区地震勘探的差异

(一) 陆上地区地震勘探

陆上地震勘探一般采用轻便钻机打井,炸药放入浅井中作为激发震源;采用速度检波器进行线性或面积组合形式接收,形成井中激发、地面速度检波器组合接收的观测方式,完成二维、三维地震勘探的采集工作。

陆上的表层结构,通过各种表层结构调查技术,即可掌握其变化规律;而且检波器与地面的耦合关系良好;近地表产生的各种干扰波也相对较少。而滩浅海地区表层结构变化剧烈,也十分复杂,掌握其变化规律十分困难,以前也一直没有在两栖地带进行表层结构调查的技术;复杂多变的表层结构导致激发震源和接收检波器都很难与地面良好耦合,近地表产生的各种干扰波也会增加。

(二) 海洋地区地震勘探

海洋地震勘探在水深大于 3~5m 时,采用地震工作船施工,激发系统采用多枪气枪激发,接收系统采用压电检波器按不同需要固定在海上拖缆上,工作船引导拖缆按测线方向前进,形成边行驶边激发边接收的工作方法。

海洋地震勘探需要精确的实时卫星定位系统,随时记录激发点和接收点的准确位置,包括海水流向造成的拖缆不同偏移方位。因此海洋地震勘探与陆地相比,其方法和装备都要复杂

得多。

(三) 滩浅海地区地震勘探

滩浅海地区由于地表的特殊性,激发方式在小于 3m 水深时使用陆上井中激发方式,而在大于 3m 水深时一般需要采用气枪作为激发震源;接收方式在小于 1.5m 水深时需要使用防水的沼泽检波器,而大于 1.5m 水深时需要使用压电检波器(水听器);滩浅海地区施工需要进行二次定位,以确定每个震源点和检波器的实际坐标方位;还需要掌握潮涨、潮落的时间,以合理安排激发震源和接收检波器及施工时间。

二、地震波表层传播的特点

由于滩浅海地区表层的特点,致使地震波在传播过程中也有相应的变化,在地震波激发端,由于表层结构复杂,形成激发波在表层中的多次虚反射,地震波多次反射震荡,在浅水中形成水面与水底的多次反射,即所谓的海底鸣震或交响混响;同样在接收端,由于检波器是放置在海底,地震波信号传播到水面,水面作为一个很好的波阻抗界面,地震波就会反射到水底,然后再从水底反射到水面,形成波的多次反射。这些波的多次反射形成了短程多次波,成为滩浅海地区特殊的噪音干扰。

三、滩浅海地区地震勘探的特点

由于滩浅海地区的特殊性,地震勘探方法既不同于陆上,又不同于海洋,还要吸收陆上和海洋地震勘探的特点,研究滩浅海地区的特点,以创新和发展一套适合滩浅海地区高精度地震勘探的先进技术,其难度很大,难点众多,这就形成了滩浅海地区高精度地震勘探的攻关研究方向。

滩浅海地区高精度地震勘探的特点,归纳起来主要有以下几点。

(一) 激发震源方面

滩浅海地区的激发震源可以根据地表条件的不同,使用炸药和气枪两种震源。

(二) 接收检波器方面

滩浅海地区的接收检波器可以根据地表条件的不同,使用沼泽检波器(速度检波器)和压电检波器(加速度检波器)接收。往往同一炮中的接收检波器既有速度检波器,又有加速度检波器;同一地点不同时刻也可能会使用不同的检波器进行接收。

(三) 观测系统方面

滩上和极浅海会使用不同的观测系统进行采集。

(四) 水中检波器定位方面

受潮汐与水流的影响,水中检波器实际位置与设计位置相比,会发生较大的偏移。

(五) 滩浅海地区特殊的干扰波

复杂多变的近地表结构会造成较强的干扰,并且滩浅海地区还存在着一类特殊的干扰波——海底鸣震与虚反射。

由此可见,滩浅海地区地震勘探有其特殊性,是处在两种震源、两种接收检波器和两套定位数据、两套表层结构数据的同时应用和统一匹配,既涉及野外施工,又涉及数据处理。要确保滩浅海地区地震勘探精度,必须系统地分析资料,研究对策,精细地解决好存在的问题,否则

必然会造成地震资料的严重失真和错误。

第三节 滩浅海地区地震勘探存在的问题

从目前滩浅海地区油气勘探的需求看,现有的地震勘探技术难以解决勘探开发中遇到的复杂地质问题,如小幅度构造成像问题、小断层断点落实问题、各类潜山推覆体的成像及潜山内幕的分辨率问题、各向异性问题、岩石物性问题等。究其原因主要在于现有地震资料的采集、处理精度不高,造成滩浅海地区地震资料解释和综合研究精度不高。而采集精度不高的主要原因在于滩浅海地区特殊的地表条件和表层结构条件限制的特殊性,使得目前现行的地震勘探装备和方法难以适应滩浅海地区高精度地震勘探的要求。同时,目前的滩浅海地震资料普遍存在着信号频率低、干扰严重、海陆连接资料差异等问题,从而降低了地震资料的分辨率和信噪比。

从目前的勘探现状来看,滩浅海地区的地震勘探方法主要存在以下问题。

一、地震信号差异问题

(一)激发问题

常规震源能量弱、频带窄。在滩浅海区使用常规炸药震源激发,面临着激发频率低、能量弱、激发产生的次生干扰严重等问题。此外,滩浅海地区地震勘探工作在陆区使用炸药,海区勘探使用气枪,使得在不同地带激发,相同位置接收到的地震信号存在频率、能量、相位及波形等方面的差异,这些差异如果处理中不能精细地进行消除,将严重影响叠加效果,降低地震剖面的品质。

(二)接收问题

滩浅海地震勘探工作中,都是在小于 1.5m 水深时使用速度检波器接收,在大于 1.5m 水深时使用水中压电检波器接收,这种速度检波器与压电检波器的混用,也造成了相同位置在不同时刻接收到的地震信号存在频率、能量、相位及波形的差异,严重影响了叠加效果及分辨率,降低了地震剖面的品质。

二、近地表结构问题

滩浅海地区近地表结构复杂,近地表岩性变化快,对地震波场影响较大,是影响野外地震资料品质的关键因素之一。研究滩浅海的近地表结构,并建立相应的近地表模型,对野外采集方法设计和室内地震波场的近地表效应补偿和校正以及干扰波的压制是必不可少的。

三、检波器漂移问题

在潮汐带和浅海地区,由于潮汐与水流的影响,检波器的实际位置会偏离原来的测定位置,处理过程中如果仍然按照测定位置进行处理,因坐标位置的偏差,从而严重影响成像质量,甚至造成错误的结果。

四、信噪比问题

滩浅海地区地震勘探工作中存在着一种特殊的干扰——海底鸣震。在浅海施工时需要使用气枪震源,由于海水与空气的界面、海底是两个强反射界面,造成了海底鸣震现象,严重影

响了地震资料的成像质量。

五、资料分辨率问题

由于采用两种震源激发、两种检波器接收,地震信号的差异普遍会造成分辨率的降低。同时,由于滩浅海地区特殊的地表及表层结构,检波器与地面的耦合不好,造成地震信号波形畸变,干扰严重,降低了地震信号品质,无法在处理中对频带进行拓宽,造成了地震剖面的分辨率不但没有提高,反而降低。

六、地震数据处理问题

由于滩浅海地区的特殊性,造成了地震数据处理的极大困难,现有的处理模块和流程满足不了滩浅海地区地震数据处理的要求,顾此失彼现象严重。因此,必须建立一套适应滩浅海地区地震资料特点的处理模块和流程,这些模块和流程必须满足野外两种震源激发、两种检波器接收及干扰波特征等因素,以满足信噪比、分辨率及浅一中深层高保真成像的要求。

第四节 滩浅海地震勘探问题的解决思路

总体上讲,滩浅海地区地震勘探问题的解决思路及技术路线包括以下四个方面。

- (1)改变激发接收技术,实现资料一致;
- (2)加强表层调查精度,提高二次定位技术,提高勘探精度;
- (3)处理上针对性去噪,一致性处理,提高信噪比和精度;
- (4)采用多波技术,实现滩海岩性勘探。

针对滩浅海地震勘探工作中存在的技术难点进行研究与创新,为解决滩浅海地区地震勘探精度不够的问题,从震源与检波器的原理研究出发,创新研制了新型炸药震源与陆用压电检波器;从地震波能量的角度出发,借助于三维观测系统的焦点震源和焦点检波器的射线束的强度和宽度的研究,研究和实现地震波波场能量分布和照明度的均匀设计与评价,进行了双聚焦分析优化三维观测系统技术研究;近地表岩性变化快,对地震波场影响较大,是影响野外地震资料品质的关键因素之一,研究和创新滩浅海地区近地表结构调查技术,并建立相应的近地表模型,可有效地解决野外采集方法设计和室内地震波场的近地表效应补偿和校正以及干扰波的压制等存在的弊端;针对在潮汐带和浅海地区,水听器的位置会随水流而出现漂移等问题,创新了在GPS和声纳定位的基础上,利用地震资料初至波信息,实现震源激发时检波器的准确定位。

在数据处理技术上,进一步研究了近地表校正技术,消除近地表介质对地震波场运动学和动力学的影响;研究了差异校正技术,消除或减弱因不同区域使用不同的激发、接收设备而造成的差异性;开展了基于波动方程的与自由表面有关多次波的压制方法研究,消除海底鸣震对地震资料的影响;研究了噪音衰减技术,有效地提高了地震资料的信噪比;通过共反射面元高精度叠加技术和高保真成像技术研究,有效地提高了地震资料的成像质量,从而提高了解决地质问题的能力。

从目前的国内外勘探现状来看,三维多波还未曾在滩浅海地区开展过。由于转换波在解决各向异性问题上的能力,并可以提取岩石物性参数等特点,使得多波多分量勘探技术成为高精度地震勘探技术的重要手段之一。在滩浅海高精度采集、处理技术解决构造成像问题的基础上,研究储层的各向异性问题、岩石物性问题,使地震勘探解决滩浅海地区油气勘探开发目

标的能力得到了充分地发挥和提高。

由此可见,滩浅海地区高精度地震勘探技术研究是创新一套采集与处理技术的系统工程,也是滩浅海地区地震技术应用于油气勘探开发全过程的系统工程,需解决的应用技术之多,攻关难度之大,涉及的技术领域之广,成为攻关研究的难点。一旦突破,滩浅海地区高精度地震技术整体水平将得到极大地提高,形成当今地震勘探的前缘技术,也必将推动滩浅海地区油气勘探技术的普遍提高,为寻找更多、更丰富的油气资源,滩浅海地区高精度地震勘探技术将发挥着首当其冲的先行作用。

第二章 滩浅海地区地震勘探采集技术

长期以来,滩浅海地区地震勘探一直是一项复杂而困难的工作。它的困难主要是由于该区域水陆相接,处在两栖地带,涨潮是水域,落潮是稀泥,并且表层结构复杂多变,这些特点无论对地震波的激发还是接收都带来了较大的困难;另外,复杂的地表条件和表层结构也对观测系统的选择产生了影响,同时会使得检波器位置发生漂移,带来一些特殊的干扰波。这些问题的存在,影响了地震资料的品质,降低了地震勘探的技术水平。

随着油田勘探开发的深入,常规的滩浅海地震勘探已无法满足新形势的需要,在滩浅海地区急需开展高精度的地震勘探技术进行改进和提高,以达到高精度勘探的目的。这样,不仅要常规勘探的各项技术进行攻关提高,更要对以往常规地震勘探中存在的问题加强重视,通过努力力争解决或改进这些问题,这也是高精度地震勘探攻关的关键。

第一节 炸药震源激发技术

在激发方面,由于滩浅海地区地表条件的变化,激发震源机制和条件也随之发生了变化,在水中一般采用气枪震源激发,在滩涂改用炸药震源激发(图 1-1-1);这两种激发震源在激发工艺和操作方法等方面都存在着很大的差异性,这不仅给野外施工带来了很大的不便,降低了勘探效率,而且由于震源类型的改变,致使产生的地震波的子波有较大的差异,使得在室内资料处理中,降低了地震资料的分辨率,影响了地震资料的质量。

一、炸药震源存在的问题

从以往滩浅海地震勘探的施工方法来看,激发过程中由于受水陆表层条件的影响,激发装置和方法都存在很大的不同,给地震波的产生都造成了较大的差异;影响了最终地震资料的品质。

滩浅海区域激发采用两种震源,水中激发采用气枪震源,滩涂采用炸药震源。激发源所处的围岩介质有较大的差别,气枪是以水作为激发介质,炸药震源是以砂泥岩层作为激发介质,两种激发介质的速度、密度存在着一定的差异,因此产生的弹性波特征也不一样;其次两种震源激发方式不同(一种是多枪组合,一种是单点激发),也会造成地震波的特性不同;此外,还存在两种震源的输出能量的差异。由于以上特点的不同,致使产生的地震子波和地震记录存在较大差异。

(一)震源差异

炸药震源和气枪震源尽管都属于脉冲震源,但在激发机理和激发方式上存在较大差异。

1. 震源机理的不同

炸药震源是快速的化学反应,产生的迅速膨胀的冲击波和爆轰气体对围岩的冲击和压缩作用;而气枪震源是对空气压缩,瞬间释放,气体对周围水的冲击压缩作用。两种震源的机理一种是化学反应,一种是物理变化。

2. 激发方式的不同

炸药震源一般是点震源激发,气枪震源是阵列组合激发。

3. 激发环境的差异

炸药震源是在井中砂泥岩中激发,气枪是在水中激发。两种环境的激发对产生的干扰和虚反射都存在较大差异。

(二) 两种震源造成的子波差异

从两种子波的特点来看,气枪震源的子波频率高、能量弱,炸药震源的频率低、能量强。这样,在同一个地震勘探工作中,就会包含两种不同特点的地震子波。这两种子波在资料的叠加处理过程中,如果不进行子波一致性处理,两种子波叠加的效果将会非常不理想;若进行子波一致性处理,将炸药震源的低频率的波向高频率的气枪子波逼近,这样就会使炸药震源子波产生一些假的信息,影响了地震信号的保真度。如果将气枪震源子波向炸药震源子波靠近,就会降低气枪震源的频率,降低资料的分辨率。尽管这样,在处理过程中也必须进行子波一致性处理,才能进行叠加。由此两种震源的激发,使地震资料受到了较大的影响,要想消除这种影响,就要使两种震源如激发点具有相同特点的地震子波或只采用一种震源。在无法实现这些做法时,就只好使一种震源子波尽可能地接近另一种震源子波。在高精度勘探中,当然是要改进低频震源向高频震源靠近,即提高炸药震源的激发频率来接近气枪震源的激发频率,以改进两种震源子波在叠加处理中的效果,提高地震资料的品质。

(三) 记录资料的差异

从两种震源的原始记录上也可以看出,存在明显的差异:炸药震源激发的记录频率明显比气枪震源记录低,但能量和信噪比要好一些。由于这些差异,在资料处理过程中,也会降低原始资料的分辨率和信噪比。

综上所述,由于两种震源的联合使用,使激发的地震子波有较大的差异,从而使得到的地震记录在频率上、能量上、信噪比上都存在较大的差异,致使在资料处理过程中降低了地震资料的分辨率,影响了地震勘探精度。因此,在实际高精度地震勘探中要尽量减少两种震源产生地震波的差异,并且要提高炸药震源产生的地震子波的频率,以靠近气枪震源产生子波的频率,保证在资料处理后地震资料具备较高的精度。

由于介质中的爆炸效应及其在地震勘探中的应用涉及爆炸力学、岩土介质动力学、固体力学和地震波理论等多学科领域,是一个跨学科的研究问题。装药结构、装药参数、炸药性质以及炸药的埋置深度、线形、介质的动力学参数等,都会对爆炸效应和波场产生影响。

二、爆炸形成地震波的能量研究

(一) 岩土介质的物理力学性质及其影响爆炸作用的指标

岩土介质中的爆炸特性主要是由岩土介质的物理力学性质与爆炸源的类型所决定的。在坚硬的岩石与松软的土体中采用相同爆炸源爆炸时,爆炸地震波的幅值和频谱特性等都有显著差异。

岩石和土体都是多组分介质,它们包含着固体、液体和气体三相成分。

岩石大多是由单一或多种矿物组成的固体介质,其中每一种矿物和空隙中的液体、气体都被看做是独立的组分。岩石的动力特性与岩石的矿物成分、三相组分的含量以及胶结程度和构造等密切相关。

土是矿物颗粒的集合体,大多是未固结的松散堆积体。矿物颗粒组成土的骨架,其间的空隙若同时充填有水或气体时,则称为三相土。土粒、水和气体分别称作土的固相、液相和气相。如果土粒间的空隙全部被水或空气充填则表现为两相性,即饱和土的固、液相和无水干燥的固、气相。对于单位体积的土,如果以 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 表示,固体颗粒、水、气的相对体积则可表示为:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1 \quad (2-1-1)$$

令 $\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2, \bar{\rho}_3$ 和 ρ_1, ρ_2, ρ_3 分别表示单位土体中固、液、气相应各相的质量和密度,则单位土体的总质量(土体密度)为:

$$\rho = \bar{\rho}_1 + \bar{\rho}_2 + \bar{\rho}_3 = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 + \alpha_3 \rho_3 \quad (2-1-2)$$

岩土介质中各相的相对含量和相互作用决定着介质的状态,从而对于介质对爆炸波的影响有着明显的影响。如由固体颗粒、水和少量封闭空气组成的三相混合介质——准饱和土,它的气相含量的变化对爆炸波的参数,如压力、波传播速度及质点运动速度有很大的影响。当气相含量接近于零时,在激励源较远的地方,传播的应力波仍是冲击波,但随着气相含量的增加,冲击波会在一定的距离外突然消失。因此,准饱和土中气相具有粘性,而液相粘性可以忽略。在爆炸荷载作用下,三相介质间无相对运动,在压力较大时,三相准饱和土可以看作非线性粘弹性介质,其中爆炸波的传播及其与结构的相互作用同非饱和土及二相混合介质有明显的差异,从而分析研究的方法也不相同。

岩土的空隙度(或孔隙比)、密度(或比重)和饱和度(或含水量)是岩土介质的重要物理指标,它们对爆炸作用的影响很大。一切岩土都是孔隙介质。这种孔隙性用孔隙度和孔隙比两个指标来表示。岩土的空隙度 n 为孔隙体积与岩土总体积的比值,而孔隙比 e 是岩土中孔隙体积与固相组分体积之比。孔隙度 n 与孔隙比 e 有以下关系:

$$n = \frac{e}{e+1} \quad (2-1-3)$$

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (2-1-4)$$

孔隙度与孔隙比都反映着土的空隙性,但在爆炸荷载和其他作用力的土力学分析中更多采用孔隙比指标。

岩土的密度为包含天然含水率和天然结构的岩土单位体积的质量。密度值的大小取决于矿物成分、含水率和结构(孔隙度)的特性。当重矿物含量、含水量提高时密度值增大,而孔隙度变大时,密度值降低。

岩土的力学性质差异很大,大部分岩石具有较高的抗压强度和弹性模量,除爆炸近源区及高温高压条件下表现为破碎和塑性变形外,基本上以弹性变形为主,应力—应变关系遵循胡克定律;而大部分土介质在不大的外力荷载下,都发生不同程度的压缩变形,故常作为流体介质处理。土的压缩性是土介质在荷载作用下产生变形的特性。粘性土有两种变化机理:第一类是骨架变形。在弱荷载时,表现为颗粒接触面上的结合物的弹性变形。强荷载时,结合物结构关系被破坏颗粒发生相互位移,表现为不可逆的塑性变形。第二类是相变形。这种变形取决于介质的各相压缩量。两种机理在土的压缩变形过程中由于介质相组分不同而处于不同的地位。但不论哪一种类型,都将对土的孔隙比产生影响。

事实上,孔隙中的相组分是含气、还是含水,以及它们所占的比重(如水饱和或准饱和),骨架结构及连接类型,矿物颗粒的成分、形状、大小,介质的密实程度、渗透性等,对土的压缩变形特性都有不同程度的影响。

应当指出的是岩土的一些物理性质指标在静载和动载条件下是有明显变化的,这可从它的静、动载弹性模量值的变化反映出来。

(二)岩土介质中爆炸冲击波参数理论计算

爆炸产生的巨大能量以波的形式作用于周围介质,在不同的区域内分别以三种不同性质的波由爆炸中心向外传播。对于其中离爆炸中心最近的冲击波来说,在其波阵面上,超压、密度、声速、质点速度、温度都存在不连续性,这种不连续性导致了熵和温度的不可逆的热力学过程。冲击波波前状态和相关参数可由力学和热力学条件给出。

根据质量守恒定律:流入波阵面上的单元体积的质量必须等于从这个体积流出的质量,可得方程:

$$\rho_0(c-u_0) = \rho(c-u) \quad (2-1-5)$$

依据动量守恒定律:单元体积的动量改变等于所作用的压力冲量,则:

$$\rho_0(c-u_0)(u-u_0) = p-p_0 \quad (2-1-6)$$

由热力学条件确定的能量守恒定律,压缩介质个别体积所消耗的功等于介质中能的增量,据此有:

$$pu - p_0u_0 = \rho_0(c-u_0)\left[E-E_0 + \frac{1}{2}(u^2 + u_0^2)\right] \quad (2-1-7)$$

当冲击波前介质为静止状态时,上述方程可简化为:

$$\rho(c-u) = \rho_0c \quad (2-1-8)$$

$$p-p_0 = \rho_0cu \quad (2-1-9)$$

$$E-E_0 = \frac{1}{2}(p+p_0)\left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho}\right) \quad (2-1-10)$$

式中 p, ρ, u, E ——分别为冲击波波阵面上的压力、密度、质点速度和比内能;

ρ_0, u_0, E_0 ——介质的初始密度、初始质点速度、初始比内能。

当介质初始压力 p_0 及单位质量内能可以忽略不计时,可把波阵面超压近似为:

$$p = \rho_0cu \quad (2-1-11)$$

波阵面质点速度为:

$$u = c\left(1 - \frac{1}{\rho}\right) \quad (2-1-12)$$

单位质量的比能为:

$$E = \frac{pu}{2\rho_0c} \quad (2-1-13)$$

能量密度为:

$$w_{ro} = \rho_0c_{ro} \int_0^\tau u^2(t) dt \quad (2-1-14)$$

式中 c_{ro} ——爆炸空腔形成过程中的冲击波平均速度。

在爆炸初始阶段临近介质的爆炸能传导系数可表示为:

$$\eta = \frac{w_{r1}}{w_{ro}} \quad (2-1-15)$$

其中: $w_{r1} = w_{ro}S$; $w_{ro} = QJ_R \times 427 \text{ kg} \cdot \text{m}$ 。

式中 S ——冲击球形表面积;

Q ——炸药重量, kg;

J_R ——炸药爆热, J/kg。

岩土介质中由冲击波产生的应力可表示为:

$$\sigma_r = \rho_0 c_i u_r \quad (2-1-16)$$

$$\sigma_\theta = \rho_0 c_i u_\theta \quad (2-1-17)$$

式中 c_i ——介质纵波速度;

u_r, u_θ ——波阵面上的径向分量和切向分量。

正压作用时间 τ 对应的质点位移为:

$$u = \int_0^\tau u(t) dt \quad (2-1-18)$$

冲量密度为:

$$I = \rho_0 c_i \int_{K_0}^\tau u(t) dt = \rho_0 c_i u \quad (2-1-19)$$

(三) 岩土介质中爆炸冲击波能量分配方法

装药在岩土中爆炸时, 岩土的破裂、破碎及抛掷是爆炸应力波和爆生气体共同作用的结果, 也就是说爆破能量是通过冲击波和爆生气体传递给岩土的。装药起爆后, 炮孔周围岩土中激起的爆炸冲击波剧烈冲击压缩岩土而形成粉碎区, 同时造成岩土质点位移, 膨胀爆腔。冲击波对岩土做功, 能量迅速衰减, 至破碎区边缘, 冲击波依次衰变为塑性及弹性应力波(以下简称应力波), 应力波的传播使岩土切向拉伸产生径向裂隙, 其扩展过程中继续消耗冲击波的能量, 应力作用强度降低, 以致在裂隙区之外只能引起岩土的弹性变形及质点振动, 紧随冲击波之后, 爆生气体继续膨胀, 进一步扩张并冲入裂隙, 产生“气模效应”, 引起裂隙延伸, 最终破碎的岩土碎块又在爆生气体剩余膨胀能量的作用下向外抛掷。因此, 炸药爆炸产生的总的爆破能量可分为冲击波能量和爆生气体膨胀能量, 前者主要消耗在岩土变形、开裂和形成粉碎区上, 后者主要用于膨胀爆腔、延伸裂隙和抛掷岩土上。

1. 粉碎区和裂隙区半径计算

1) 粉碎区

炮孔周围岩土中的粉碎区是爆炸冲击波强烈冲击压缩的结果, 其范围是由冲击波强度和岩土强度共同决定的。假设冲击波后岩土为不可压缩流体, 粉碎区半径为:

$$R_c = r_0 \left(\frac{\rho_m c_p v_0}{K_0 [\sigma_c]} \right) \quad (2-1-20)$$

式中 ρ_m ——岩土密度;

c_p ——岩土纵波速度;

v_0 ——孔壁岩土质点初始移动速度;

$[\sigma_c]$ ——岩土静态单轴抗压强度;

K_0 ——冲击波作用岩土强度提高系数, 可取 $K_0 = 10$;

r_0 ——炮孔半径。

2) 裂隙区

粉碎区外, 冲击波衰变成应力波, 在其作用下, 岩土中形成径向裂隙区, 其半径为:

$$R_l = r_0 \left(\frac{\lambda p_m}{[\sigma_t]} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2-1-21)$$

式中 $[\sigma_t]$ ——岩土抗拉强度;