

SHANQIANDAI DIZHEN KANTAN SHIJIAN

山前带地震勘探实践

刘保林 周芝旭 殷厚成
陈红桥 姚本全 曾凡惠 编著



石油工业出版社

山前带地震勘探实践

刘保林 周芝旭 殷厚成 编著
陈红桥 姚本全 曾凡惠

石油工业出版社

内 容 提 要

在地形起伏剧烈、浅表层激发岩性多变、高速介质裸露、构造形变复杂等特定的地震地质条件下,山前带地震勘探仍存在震源激发、观测系统设计优化、静校正处理等问题。本书以新疆米泉等地区的地震攻关试验资料为基础,分析了激发介质形变和地震波振幅、频率的关系;论述了倾斜界面一次覆盖长度与排列长度的关系和剖面信噪比与单炮资料信噪比、覆盖次数间的关系;提出了观测系统设计中确定最大炮检距、覆盖次数、道间距等采集参数的方法和原则;介绍了山前带静校正处理基本的原理和方法;以 DLK 地区、LTC 地区的资料处理为例,论述了不同地震地质条件下的静校正处理策略。

本书旨在对近年来江汉物探处在山前带地震勘探实践中所取得的成果进行概括和总结,希望能为从事山前带地震勘探的同行们提供些借鉴与参考。

本书可供石油物探专业技术人员和高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

山前带地震勘探实践/刘保林等编著.

北京:石油工业出版社,2005.9

ISBN 7-5021-5224-5

I. 山…

II. 刘…

III. 地震勘探-研究

IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 108635 号

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.cn

总 机:(010)64262233 发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技排版中心

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:7

字数:174 千字 印数:1—1000 册

定价:38.00 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

江汉石油管理局地球物理勘探处(简称江汉物探处)山地地震勘探实践始于20世纪70年代初期,至今已有30多年的山地地震勘探历史。在长期的生产实践和科研攻关中,积累了丰富的山地地震勘探经验。尤其是近十年来,江汉物探处在包括南方山地、逆掩推覆带、高陡构造带、西部黄土塬、戈壁、沙漠等复杂地区的油气勘探中,进行了大量的试验攻关,取得了一些有价值的成果与认识,基本上建立了一套适应各种复杂地震地质条件下的地震勘探技术系列,包括山地地震勘探技术、碳酸盐岩裸露区地震勘探技术、黄土塬地震勘探技术等,成果受到委托方的充分肯定。

然而,地震勘探技术是一项非常复杂的系统工程,仍面临许多技术难点。具体就山前带地震勘探技术而言,在地形起伏剧烈、浅表层激发岩性多变、高速介质裸露、构造形变复杂等特定的地震地质条件下,震源激发、观测系统设计优化、静校正处理等仍是主要的问题。这些问题的完全解决,需要一个不断探索和完善的过程。本书以江汉物探处在新疆米泉等地区的地震攻关试验资料为基础,在震源激发、观测系统设计的优化、静校正处理方法等方面开展了探索性的工作。

本书详述了山前带地震勘探涉及的问题,概述了大面积碳酸盐岩、黄土、山前冲积扇体和 high 倾角地层(高陡构造带)地震勘探中存在的问题。本书的一个重要创新是从爆炸理论和勘探实践两个方面,分析了激发介质形变和地震波振幅、频率的关系,系统地提出了“饱和激发”的概念。本书论述了倾斜界面一次覆盖长度与排列长度的关系,剖面信噪比与单炮资料信噪比、覆盖次数间的关系,观测系统设计中确定最大炮检距、覆盖次数、道间距等采集参数的方法和原则,对指导观测系统设计的优化与改进有一定的参考价值。本书介绍了山前带静校正处理的基本原理和方法。以DLK地区、LTC地区的资料处理为例,论述了不同地震地质条件下的静校正处理策略,为其他类似地区的静校正处理提供了借鉴。

江汉物探处有着光辉的发展历史,在石油勘探行业一度享有较高的声誉,尤其是在山前带地震勘探领域,一直处于国内领先水平。本书旨在对近些年江汉物探处在山前带地震勘探实践中某些方面所取得的成果进行概括和总结,同时,也希望能为山前带地震勘探技术的进步和发展,做一点有意义的事情。

本书共分5章。第1章介绍了山前带地震勘探存在的主要技术问题,以及山前带地震勘探主要的研究内容。第2章强调山前带复杂的浅表层地震地质条件下的浅表层结构调查,应考虑采用地质露头、小折射、微测井等多种方法相结合。第3章内容包括采集参数论证的理论基础、计算实例。模型正演技术和照明技术是观测系统优化与改进的主要技术手段。第4章探讨了饱和激发与激发岩性、井深、药性、药量、组合激发,以及介质含水饱和度等因素的关系。第5章提出了针对不同地震地质条件下静校正的处理策略。

本书是在刘保林、周芝旭的指导下撰写完成的。初稿由刘保林、周芝旭、殷厚成、陈红桥、姚本全和曾凡惠完成。全书统稿由刘保林、殷厚成完成。

限于笔者水平,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2005年8月18日

目 录

1 绪论	(1)
1.1 山前带的概念及特征	(1)
1.2 山前带地震勘探的意义	(3)
1.3 山前带地震勘探的主要困难	(3)
1.3.1 近地表地层结构复杂	(4)
1.3.2 深层地震地质条件复杂	(9)
1.4 山前带地震勘探涉及的问题	(10)
1.4.1 碳酸盐岩地震勘探涉及的问题	(11)
1.4.2 黄土及山前冲积扇体地震勘探涉及的问题	(11)
1.4.3 山地高倾角地层(高陡构造)地震勘探涉及的问题	(12)
1.4.4 山前带地震勘探涉及的其他问题	(12)
1.5 山前带地震勘探研究的主要内容	(13)
1.5.1 近地表地层结构模型的建立	(13)
1.5.2 基于正演模型的观测系统设计	(13)
1.5.3 试验方法研究	(13)
1.5.4 钻井工艺研究	(13)
1.5.5 处理方法研究	(13)
2 山前带浅表层结构调查方法	(14)
2.1 地面地质调查	(14)
2.2 小折射	(14)
2.3 单井微测井	(15)
2.4 双井微测井	(16)
2.5 MVSP	(17)
2.6 层析成像	(18)
2.7 瑞雷面波	(19)
2.7.1 方法原理	(19)
2.7.2 施工方法	(19)
2.7.3 资料处理及结果	(20)
3 山前带地震采集观测系统设计	(23)
3.1 采集参数论证的理论基础	(23)
3.1.1 地震分辨率	(23)
3.1.2 道间距或面元边长	(24)
3.1.3 最大炮检距	(25)
3.1.4 覆盖次数的选择	(28)
3.1.5 偏移孔径	(29)

3.1.6	检波器、震源组合形式的选择	(30)
3.1.7	观测形式的选择	(31)
3.2	采集参数计算实例	(32)
3.2.1	纵横向分辨率	(32)
3.2.2	最大炮检距的选择	(33)
3.2.3	道间距的选择	(33)
3.3	观测系统设计的优化与改进	(34)
3.3.1	以往资料的分析	(34)
3.3.2	射线追踪	(40)
3.3.3	基于波动方程的照明分析	(41)
4	山前带地震波的激发	(45)
4.1	炸药震源与饱和激发	(45)
4.1.1	弹性介质中的饱和激发概念	(46)
4.1.2	饱和激发与激发介质	(48)
4.1.3	饱和激发与激发井深	(49)
4.1.4	饱和激发与介质的孔隙度、含水饱和度	(50)
4.1.5	饱和激发与激发药性的选择	(52)
4.1.6	饱和激发与组合激发的关系	(55)
4.1.7	动弹模量与地震波的频率	(56)
4.1.8	地震波的衰减	(57)
4.1.9	有关激发的其他问题	(58)
4.1.10	确定饱和药量的方法	(62)
4.1.11	小结	(64)
4.2	可控震源	(64)
4.2.1	可控震源施工因素试验	(65)
4.2.2	可控震源与炸药震源对比试验	(70)
5	山前带地震资料处理中的静校正问题	(72)
5.1	静校正及其方法	(72)
5.1.1	静校正问题的提出	(72)
5.1.2	静校正方法分类	(75)
5.2	静校正方法概述	(76)
5.2.1	基准面静校正	(76)
5.2.2	剩余静校正	(87)
5.2.3	波动方程拉平	(91)
5.3	山前带静校正方法及实践	(94)
5.3.1	山前带静校正策略	(95)
5.3.2	复杂地形地区的静校正处理实例	(96)
	参考文献	(104)

1 绪 论

石油,作为一种重要的能源和化工原材料,对全世界的经济发展乃至整个人类文明进步都起着至关重要的作用。近几十年来,全球对石油的需求始终保持着旺盛的增长趋势。我国作为一个拥有十多亿人口的发展中大国,随着经济水平、工业化程度和人民生活水平的不断提高,对石油的需求也日益增加。尤其是近十余年,经济的快速增长导致石油的需求更显急剧增长之势。

石油是一种不可再生的资源,业已探明石油天然气地质储量尚不能满足需求,缩小需求与可供资源量之间的缺口,就必须不断有新的发现。如此,石油勘探就势必要向更广泛、更复杂的领域进军。山前带因其独特的成油气地质条件成为当今陆上石油勘探的重要领域之一。

1.1 山前带的概念及特征

就地理地貌学的一般概念而言,大陆地表按照高程和起伏特征,大致可分为山地、丘陵、平原、高原、盆地等主要地貌形态,如图 1-1 所示。

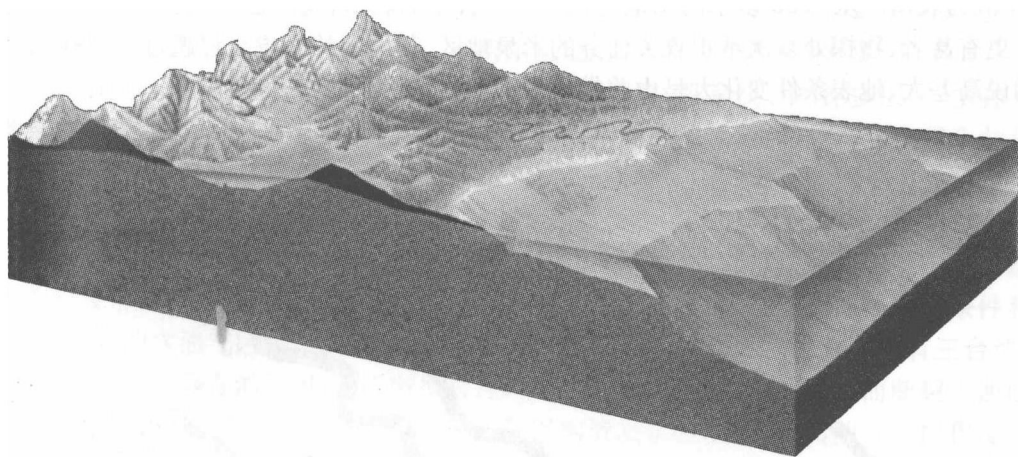


图 1-1 陆地地表地貌形态示意图

山地:一般指海拔高程大于 500m、相对高差大于 200m 的地区。根据海拔高度又可分为高山(3500m 以上)、中山(1000m 以上)和低山(500m 以下)。

丘陵:地表起伏不大、山峦林立的低矮地形。一般海拔小于 500m,相对高差几十米(小于 200m)。它介于山地和平原之间。

平原:地势宽广较平坦,四周为山岳,或山地与海洋之间。如华北平原、松辽平原。根据海拔高度又可分为低平原(小于 200m,如华北平原)、东北平原和高平原(200~600m,如成都平原)。

高原:海拔 600m 以上的宽广地区,四周为陡崖。如青藏高原,海拔 4000m 以上,为世界上最高的高原。

盆地:四周为高原或山地,中央低平(平原或丘陵)。如四川盆地、柴达木盆地。

洼地:高程在海平面以下的低洼区。如吐鲁番盆地中的艾丁湖水面比海平面低 150m,称克鲁泌洼地。

裂谷系统:指大陆上巨型线状低洼谷地,这是地壳上被拉张而裂开的地区。如东非裂谷。

这个分类中,没有我们所说的“山前带”这一概念。顾名思义,山前带从地理地貌的意义上来说就是指从山地到平原的整个过渡地带。也可以说是近几年石油地震勘探常常涉及到这一区域,人们约定俗成的一种称谓。从某种意义上讲,“山前带”之说起源于石油勘探(或更具体地说是石油地震勘探)。人们或许会产生这样一个疑问:这里所说的“山前带”与“逆冲推覆带”是什么关系?可以说在很大程度上两者所指不分彼此,在大地构造或区域构造上就有“无山不推”之说,也就是说推覆是常常和山联系在一起的,有山就会有山前带。只不过“逆冲推覆带”是地质意义上的概念,而“山前带”则主要是从地理地貌意义上讲的。但有时两者也不能完全等同,因为从地震勘探作业的尺度上来看,有时所遇到的山或山前带,其下并不存在明显的推覆,如近年江汉油田物探处在新疆准噶尔盆地 CPZ 构造带(中西段)所施工的区域就是如此。从石油地震勘探的基础——地震资料采集这个层面而言,克服地形地貌的影响是第一道关口,而其影响较之于地下深部也更为直接,本文中更多地采用了“山前带”这一概念也是出于这种考虑。

山前带的特征:图 1-2 是江汉物探处施工过的某一工区的实际高程的立体图。图中 A 区为海拔较高的山地,B 区为山前堆积的巨厚的黄土砾石层,C 区为海拔相对较低的戈壁沙漠地带,D 区为农田。从 1000 多米的山地变化为四五百米的农田,其高程、地表地貌的变化是巨大的。更有甚者,物探处多次承担攻关任务的米泉地区,其山地的海拔高程超过了 4000m。因此我们说高差大、地表条件变化大是山前带较为明显、也较为普遍的特点。

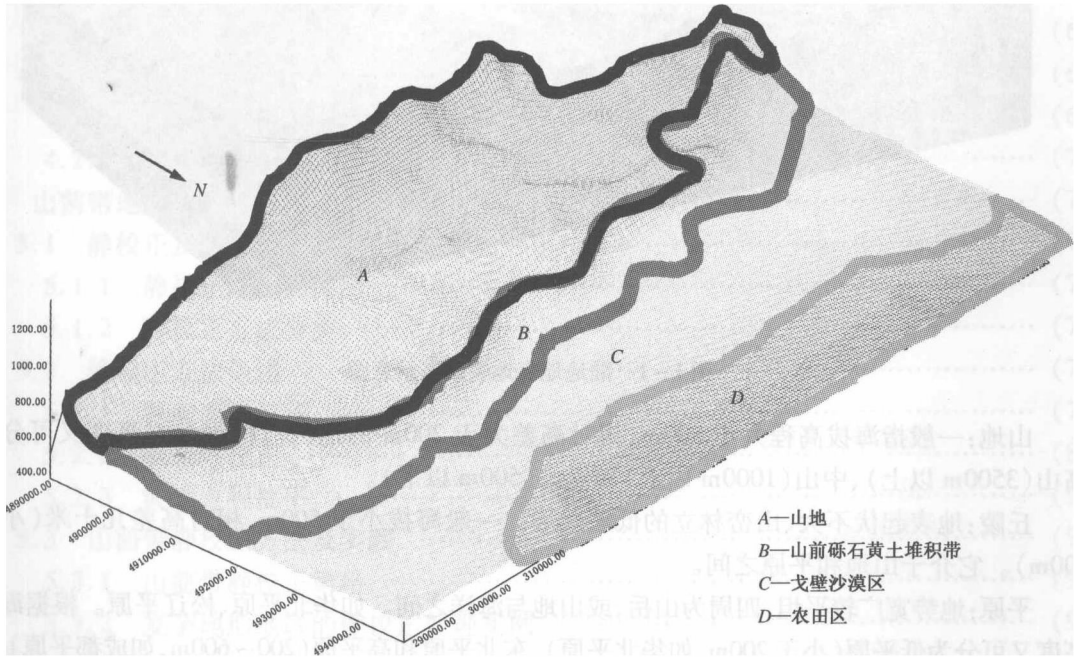


图 1-2 山前带地貌形态示意图

1.2 山前带地震勘探的意义

山前带特殊的地理位置及与逆冲推覆密不可分的关系,赋予了山前带在石油勘探方面的独特意义。

首先,从区域地质的意义上,山前带常常与“盆”、“山”关系联系紧密。我们知道,石油是在盆地中生成的,没有“盆”,就没有“油”;“山”是构造运动的产物,“盆”外不造山,就没有盆地中的构造,就无所谓圈闭,也就无所谓油藏。同时,既有“无山不推”之说,就必然存在水平挤压力。正是由于水平挤压作用,使盆地边缘区域被一些“推”过来的老地层所掩盖,其下可能形成大型的隐伏构造。

其次,由于上覆老地层的压实及造山应力作用,促进了下伏沉积中烃源岩的成熟转化与运移。因此山前带有比盆地中央更具优越的成藏条件,进行山前带勘探极具现实意义。

20 世纪 70 年代中期,美国落基山逆掩推覆断裂带(逆冲带、逆掩带)发现 Pineview 油田,引起了石油地质界对逆掩断裂勘探前景的重视。此后,犹他州—怀俄明州掩冲带、东部阿巴拉契亚逆掩带、南部沃希托逆掩带等地区相继有重大发现。逆冲推覆体成为了油气勘探的新领域。我国的天山造山带北部推覆体、东秦岭造山带南部推覆带与美国落基山逆掩推覆断裂具有相似的地质特征,被许多石油地质学家认为是含油气资源极其丰富的地区之一。

山前带含油气系统的演化与原形盆地具有相同特征。天山造山带北部的准噶尔盆地是我国主要的含油气盆地之一,多期构造运动的叠加,不仅造就了盆地各次级构造单元的复杂性,同时也形成了众多的含油气圈闭或构造。准噶尔盆地南缘,山前发育多排构造带,形成众多局部构造,区域地质、地震综合研究成果表明,区域性盖层发育,具有浅、中、深多层次、多种类型的成藏条件和成藏模式。探明的呼图壁气田卡 6 井获得高产油气,土谷鲁背斜土谷 2 井获工业油流,柴参侧 1 井经解释获得 96m(36 层)油气层,证实了天山造山带北部推覆体具备良好的成油气地质条件和勘探前景。

准噶尔盆地南缘博格达山北缘山前断裂带是天山造山带北部推覆体主要的次级构造单元。山前断裂带与盆地经历了相同的构造—沉积演化历程,具有相似的成油气地质条件和成藏模式,是有利的含油气区块。山前断裂带东段西地 2 号背斜、小泉沟背斜发现有三台油田、三台气田、甘河油田等含油气田,西段南阜康背斜、七道湾背斜见油气显示。而断裂带西段米泉,受勘探技术、勘探方法、浅地表地质条件及深层构造复杂程度的限制,油气勘探程度仍然较低。

加强准噶尔盆地南缘博格达山北缘山前断裂带以地震勘探为主的综合物探方法攻关,寻求西部山前带油气勘探的新突破,成为了众多地球物理学家、地质学家的共识。2002—2004 年,江汉物探处在准噶尔盆地南缘博格达山北缘山前断裂带西段米泉地区,开展了山前带地震方法攻关试验,获得了可供地质解释的地震剖面。山前带的地震勘探取得了实质性进展。

1.3 山前带地震勘探的主要困难

地震地质条件是地球物理勘探学家们十分关注的问题。一个地区的地震地质条件,在很大程度上,决定了地震勘探的特点,包括技术方法与劳动组织等诸多方面。有关山前带地震勘探的特点,在众多的有关山前带地震勘探技术和方法的文献中,有过详细的描述与归纳。就准

噶尔盆地南缘博格达山北缘山前断裂带地震地质条件而言,基本包括了复杂山地、碳酸盐岩、高陡构造带以及黄土塬等特殊地震地质条件下的地震勘探所面临的技术难点和施工难点。表现在近地表地层结构复杂、深层构造复杂、生产成本高、生产效率低。

1.3.1 近地表地层结构复杂

米泉地区位于准噶尔盆地南缘,博格达大山以北。地貌包括北部戈壁和南部山地及丘陵区。浅表层的地震地质特点可概括为:纵横向激发岩性多变,浅层地层产状变化大,低降速带厚度、速度变化大,潜水面深度变化大,地形高差大。

1.3.1.1 纵横向激发岩性多变

近地表出露的地层有浅表层石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系和第四系。激发岩性可分为四类,即碳酸盐岩、砂泥岩、黄土和砾石。石炭系、二叠系、三叠系以碳酸盐岩为主,侏罗系、白垩系为砂泥岩。第四系为黄土夹砾石(见图1-3)。

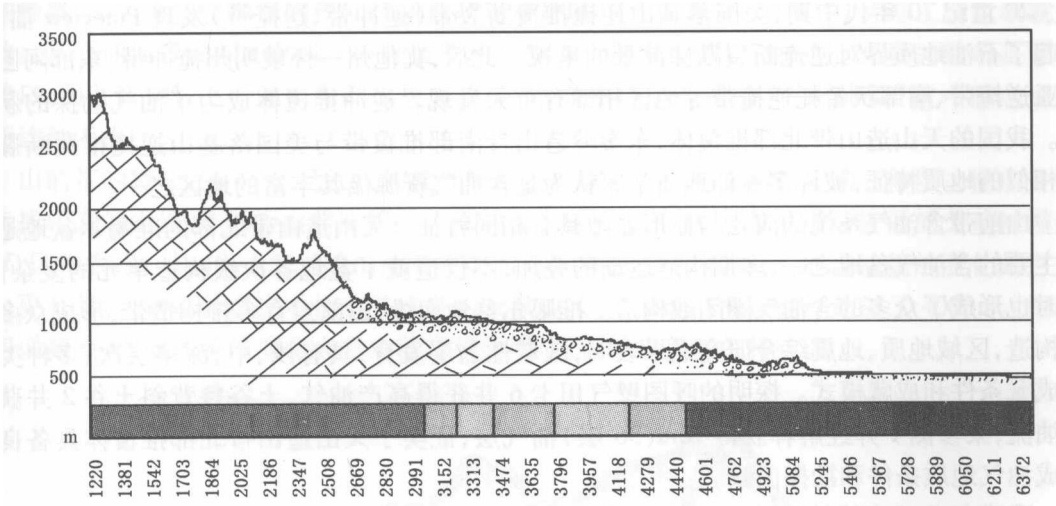


图1-3 米泉地区某测线表层岩性变化示意图

碳酸盐岩主要分布于南部的高山区,约占40%,海拔高程一般在2500m以上;砂泥岩出露于中南部中低山区,约占20%左右,工区西北为低山区,海拔高程一般在千米以下,表层为黄土覆盖,厚2~8m不等,下伏为黄土砾石层,砾石直径一般在10~20cm,厚度变化范围在5~20m。广大的戈壁大面积出露第四系冲积—洪积的戈壁砾石、卵石和亚砂土,砾石直径在1~5cm,厚达100m以上。在碳酸盐岩和砂泥岩分布区,局部见1~8m不等厚的黄土砾石层。

图1-4为鄂东地区某测线地表地层及高程变化图,其中二叠系为石灰岩,侏罗系为煤系地层,志留系及三叠系为砂泥岩,岩性的横向变化及高程变化都很大。

岩石的力学特性决定了激发地震波的振幅特性和频率特性。岩性纵横向的变化决定了激发接收条件存在差异,而直接影响地震原始资料的品质。

首先地震激发能量存在差异。炸药在介质中爆炸激发地震波时,载荷是一个突变的冲击载荷。冲击载荷对介质的影响从内向外大体可分为破坏圈、塑性带和弹性变形区。随着药量的增加,冲击波压力增强,破坏圈、塑性带半径增大,而弹性变形区介质的最大动载荷满足雨贡纽冲击关系^[1],等于介质的动抗压强度。岩石的动抗压强度,与岩性及其固有的弹性性质密切相关。

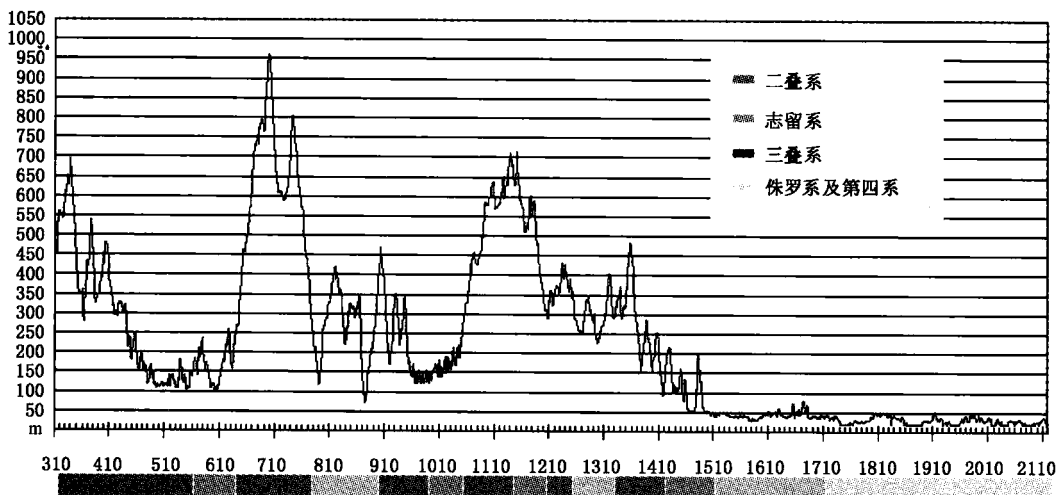


图 1-4 鄂东地区某测线表层岩性及高程变化示意图

理论上可以证明,在介质中传播的地震波的振幅大小与激发介质弹性参数 λ 、 μ 成反比。不同岩性的动抗压强度及弹性参数 λ 、 μ 性能各不相同,因此,激发的地震波振幅的大小也不相同。从另一方面理解,由于爆炸能仅有一部分能量转换为弹性振动而形成地震波,不同激发介质激发的地震资料的信噪比也不相同。此外,相同的激发介质或岩性,因组成、结构、构造、孔隙度、含水饱和度的差异,也会引起其弹性性质的差异。激发的地震波振幅特性也不同。生产实践证明:高孔隙饱和和含水的砂岩是理想的激发介质,而碳酸盐岩、砂砾层以及松散的黄土等是较差的激发岩性。

激发岩性不同,激发地震波的频率也存在差异。尽管地震勘探要求激发能产生有较宽的频谱和有足够分辨率的纵波,期望产生的原生和次生干扰越弱越好,资料的信噪越高越好,而事实上,介质中激发地震波的初始频率与激发介质弹性参数成正比。一般条件下,激发介质的速度越高,激发地震波的初始频率越高,而弹性震动越小。松散的黄土,激发的频率低,低频能量强。致密的碳酸盐岩,激发的频率高,而高频能量弱。泥质岩及饱和含水的砂岩,激发频谱适中,干扰相对较弱。

岩性的变化对接收也存在一定的影响。在地震资料采集中,强调检波器埋置的作用在于使检波器和介质组成一个阻尼较好的振动系统,提高对地震波的分辨能力。地震检波器与地面组成的谐振系统的频率特性与介质组分、力学特性相关。在相同的激发条件下,不同的岩性接收的地震响应会存在差别(图 1-5),这种差别与在不同介质中激发,其激发地震波的振幅特性和频率特性存在的差异具有相同的道理,从介质弹性振动与介质弹性参数间的关系很容易理解。在植被茂密的山地,当检波器安置在草丛树根附近,风吹草动形成高频不规则干扰。野外可以减小这种差别。用土将检波器坑填平、压紧,能使检波器—土壤系统的阻尼增加,自由振动减弱(图 1-6)。国外有关山地地震勘探的许多文献中,都强调检波器的埋置条件,并把在未风化基岩中钻孔埋置作为主要的攻关技术。也门 Kharir 油田的三维地震,在非常坚硬的石灰岩出露区,利用手钻埋置地震检波器,以确保检波器的耦合及检波器的垂直性,而激发采用的是 $1.8\text{m} \times 500\text{g} \times 6$ 组合。针对碳酸盐岩裸露区的地震地质条件,美国地球物理学家 Ozdogan Yilmaz 提出了这样的一种埋置方式:将检波器串垂直焊接在有一定厚度的平铁板之上,铁板采用三个可调节的尾锥,以保持铁板的水平,并使检波器与基岩耦合,这种埋置方式的

意义,最大限度保持了检波器的垂直和耦合,使每个检波器串接收条件具有相对的一致性。而这种埋置方式带来了处理技术的问题。由于表层的速度与下伏地层差别较小,来自不同方向的反射线并不垂直地表,且不同深度反射界面的反射线出射时会有不同的方向,从而有不同的静校正量,产生所谓“静而不静”问题。在地形相对高差较大或浅表层地层厚度巨厚时,或构造复杂地区,这类问题更加严重。

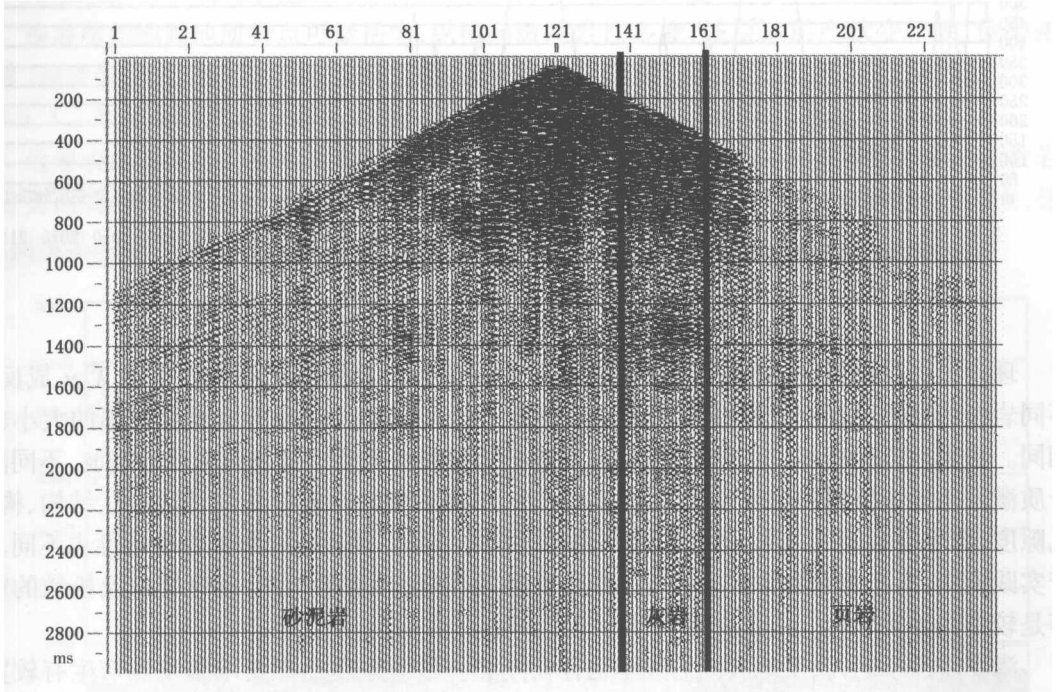


图 1-5 单炮记录 30 ~ 60Hz 倍频分析(砂泥岩激发,17.5m × 14kg × 1,中密度)

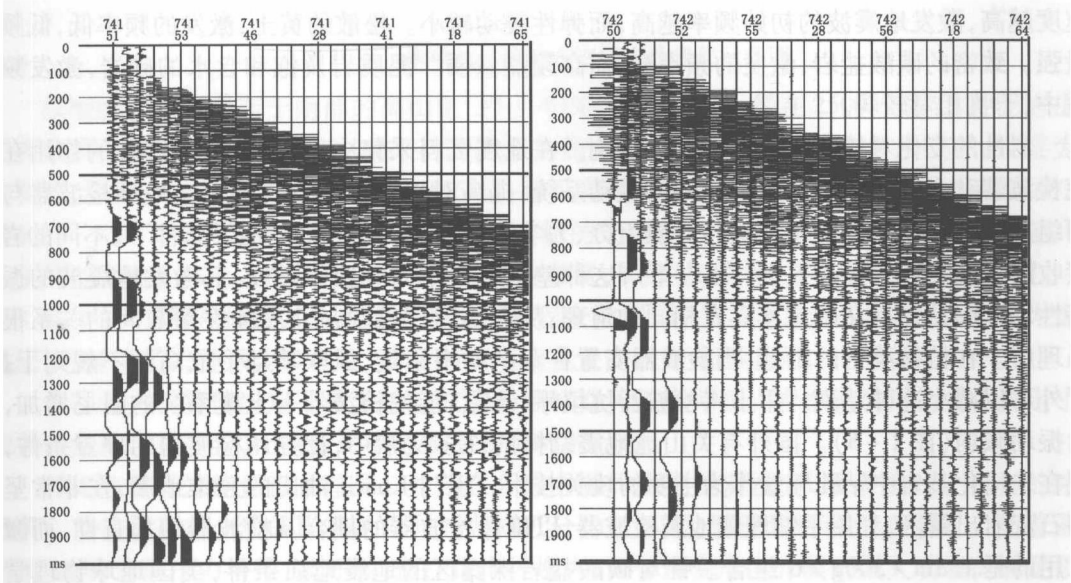


图 1-6 检波器埋置试验(741 填土、742 不填土、共检波点道集)

岩性横向变化给按理论的组合图形进行检波器组合带来一定影响。由于岩性的横向变化,在相当一部分检波器串的组合区域,会出露不同岩性,而不同岩性的地震响应是不同的,组合后的地震响应会产生畸变。

综上所述,表层岩性在横向上的较频繁变化均可能引起地震波运动学特征和动力学特征的改变,导致地震记录的能量、频率、干扰背景等在横向上的不稳定性变化,炮集、检波点道间记录品质差异较大,增加了资料处理的难度,最终影响了剖面质量。

1.3.1.2 浅层地层产状多变

山前带是构造强烈形变的产物,空间上地层产状多变是构造复杂的表象。地面地质调查结果和已获得的地震剖面表明,区域地层由北向南逐渐变陡,产状变化在 $10^{\circ} \sim 70^{\circ}$,构造核部地层产状近于直立。浅层地层产状的变化与纵横向岩性的变化,构造了一个不连续变化或很不均匀的地质—物理模型,这种“不均匀”的地质—物理模型引起了地球物理特性的复杂变化。

岩石的力学特性与岩石的构造相关。地层产状的变化,改变了激发介质的岩石力学特性。试验的局限性,使得试验的结论不具有广泛的适应性,影响地震资料品质。

浅层地层产状的变化会改变波的射线路径。习惯上,人们在研究地震波的传播时,常用几何地震学的概念去探讨其射线的传播路径。当反射界面的产状由平直过渡到直立或倒转,其反射线的传播路径会发生畸变,背离正常方向发生偏转,此时,来自深层反射界面的反射波折射到地表时,也偏离了理论上“垂直”地表的概念。总之,因浅表层地层产状的横向剧烈变化,射线路径变得相当复杂。浅层地层产状的变化对浅层的反射影响明显。地震资料处理中,常常会遇到这种情况,单炮记录和叠加剖面,中深层资料品质较好,而浅层品质差,这与表层结构不均匀性导致地震资料变差有一定的成因联系。

从物理地震学的理论去分析,“不均匀”的地质—物理模型会使弹性振动的波前产生畸变,对有效波的衰减、吸收、波前扩散等均造成强烈影响,形成面波、折射波等相干噪声和随机干扰,引起地震记录的振幅、相位或频率的变化,使原始资料信噪比降低,炮间和道间的记录能量、面貌产生较大差异。

无论是原始单炮还是剖面叠加质量均受到表层结构不均匀性的严重影响。这是山前带地震勘探中应当十分注意的一个重要特点。在地面地质调查的基础上,合理的布设测线,针对性的采集参数优化是解决问题的技术关键。

1.3.1.3 低降速带厚度、速度变化大

低降速带厚度变化大是西部山前带一个显著的特点。

多期构造运动形成了山前带山高、坡陡复杂的地形地貌,不同时代的地层裸露于地表,原岩的岩石特征在外营力的地质作用下不间断地改变。以及山洪、滑塌等作用,岩石产生碎裂、溶蚀,在相对平缓的低地,原岩化学风化强烈,长期的淋滤、侵蚀,常形成疏松的土层,而高山区以物理风化为主,原岩碎裂、崩塌,则形成大小不等的岩块。沟谷区常见成熟度较低的砂砾层,而山谷、河口,发育巨大的冲积扇体,冲积扇体最厚达200m。空间上,因风化作用的差异,风化层的组分、结构、构造、含水饱和度以及风化层厚度分布很不均匀。

风化层的组分、结构、构造、含水饱和度的差异,决定了低降速带横向变化的不连续性(图1-7)。

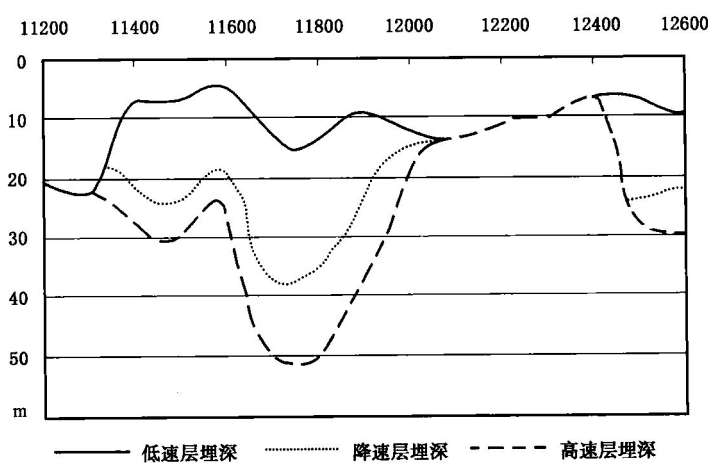


图 1-7 新疆地区某测线低降速厚度变化图

低降速带厚度、速度横向变化的不连续,与浅表层地层产状的剧烈变化,构造了浅表层“不均匀”的地质—物理模型。一方面,横向不均匀导致地震波的运动学特征和动力学特征发生改变,另一方面,带来了严重的静校正问题。地震资料采集中,巨厚的低降速带会产生较大的静校正时移,反射波组无法连续追踪(图 1-8)。此外,低降速带厚度、速度横向的不连续变化也会带来地震组合问题。

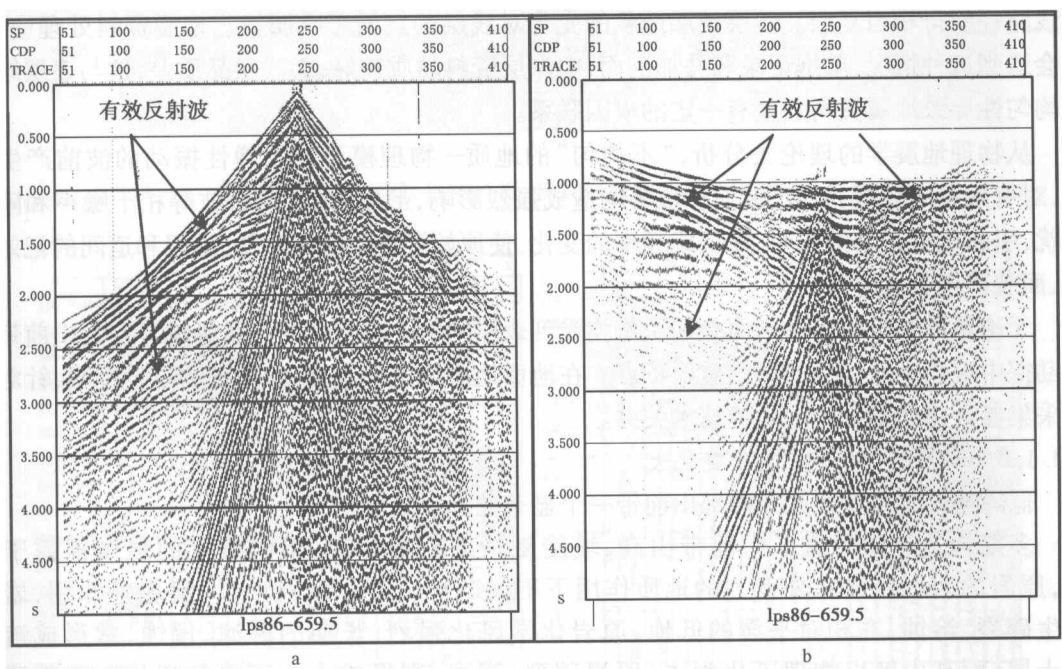


图 1-8 一个初至拉平后记录的对比

a—原始单炮记录,右半支排列难以识别有效反射;b—初至拉平后的记录

低降速带变化大的地区,建立准确的浅表层结构模型,解决与低降速带有关联的地震问题是地震勘探的关键。目前,浅表层结构调查采用地面地质调查、小折(反)射、微测井、浅井 VSP 和层析成像等方法,为问题的解决提供了地质和地球物理依据。

1.3.1.4 潜水面深度变化大

山地一般没有统一的潜水面,潜水面的深度变化与地形的相对高差和岩性横向变化有密切的内在联系。

山地潜水面总体的变化趋势,随地形起伏而起伏,随地形增高而加深,而岩性变化对潜水面变化的影响更甚。米泉地区水文地质调查结果表明,平坦的戈壁,潜水面深度在 5 ~ 6m;海拔 1000 ~ 1600m 砂泥岩分布区,潜水面深度变化在 10 ~ 30m;1500 ~ 3800m 中、高山碳酸盐岩裸露区,潜水面一般在 50m 以下;巨大的冲击扇体,潜水面的一般变化在 10 ~ 100m 之间。

有资料研究表明,对于相同的激发介质,饱和含水比不含水激发的地震波的振幅要强、频带要宽。地震资料采集中,为了提高激发地震资料的品质,一般强调在潜水面下 1 ~ 3m 激发。

由于潜水面深度的剧烈变化,完全保证炸药在潜水面下激发存在着诸多的问题。首先是如何准确确定潜水面深度存在技术困难,其次,在 50m 以下的深井或超深井激发,钻井的成本高、时效低等。在潜水面深度变化大的山地,激发技术是提高资料品质的关键技术。

1.3.1.5 地形相对高差大

位于准噶尔盆地南缘的博格达山,是天山山系的重要组成部分。准噶尔盆地,海拔高程在 600m 左右,博格达山,海拔高程达 5445m。由于地形切割严重,地形起伏大,相对高差大,同时,通视条件差,交通不便,环境恶劣,增加了山前带地震施工难度。

起伏的山地给地震测量造成极大困难,尤其是植被高覆盖区,为了保证测量的精度,有时必须沿测线砍伐,以形成通视及工程作业的通道。

和大多数山区一样,由于交通十分不便,地震采集施工装备运输、劳动生活补给以及劳动组织相当困难。绝大多数情况下,钻井设备、采集仪器和生活保障用品,由人抬肩扛到工地,劳动强度大,施工条件极其艰苦。

地形起伏大、相对高差大,野外静校正问题十分突出,同时,检波器组合难以按设计的组合方式布设,组合效果变差。

地形起伏对地震激发的影响是明显的。相同的激发介质,在不同的地形条件下,岩石静抗压强度的分布是不相同的,从而激发的地震波能量和频率存在差异。一般的情况下,低地激发比高坡地激发的效果要好。生产实践中,人们用 $E = K/H$ 这一公式近似来描述激发能量随地形起伏的变化。式中, E 为激发能量, K 为反比系数, H 为激发点高程。从式中可知,激发点位置越低,激发能量就越强,反之激发能量变弱,并总结出“避高就低,避山就水,避碎就整,避土就岩”的定井原则。

可见,地形相对高差大造成了许多地震勘探上的技术问题,包括激发问题、静校正问题等,同时,劳动组织、物质保障也变得极其困难。

1.3.2 深层地震地质条件复杂

影响野外地震资料品质的诸多因素,有接收条件、激发条件、各种噪声的干扰、多次反射和折射、波前扩散与吸收衰减、中间界面的透射损失、反射界面形态产生的聚焦和发散作用、界面的反射系数、入射角的变化、岩相的变化等。相同的激发条件和接收条件下,具有相同沉积序列的地震资料品质,取决于沉积序列中界面波阻抗的差异和构造的复杂性。

1.3.2.1 构造复杂、地震波场变化大

山前断裂带是多期构造变形的产物,多种构造样式时间和空间上的叠置、继承、改造和转化,其构造形态复杂,地层产状空间变化大,且断裂发育。据大地构造研究,准噶尔盆地以及构

造演化大致经历了四个阶段,其中影响改造最大的是晚石炭—二叠纪断陷盆地形成阶段和中新世统一盆地演化阶段。前者造成隆坳相间的断陷盆地带和隆起带,控制了盆地的成油气地质条件,后者盆地边缘的地层强烈形变,形成了复杂的山前断裂带。博格达山前断裂带形成的主要时期为二叠纪,中生代具有脉动式的隆起活动,新生代则强烈隆起。

博格达山北缘山前断裂带,以乌鲁木齐为界,东带主要为二叠系—三叠系组成的长轴状、线状背斜,依随博格达山势展布,平面上呈弧形分布。褶皱受纵向逆冲断层影响,破坏较大。西带主要为白垩系—侏罗系、三叠系组成的长轴背斜带,背斜轴部常见逆断层切割。地表许多压性构造如背斜、逆断层、叠瓦构造、逆掩推覆体等,表明背斜具有挤压特点。在发育的背斜构造群中,背斜南缓北陡,南翼倾角 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$,北翼倾角可达 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$,其空间展布呈叠瓦状。由于褶皱紧闭、产状陡,常规的地震方法很难收到有效反射。此外,地层曲率变化大,使正常反射波与异常波(回转波、断面波、绕射波等)交混在一起,原始资料信噪比低。

因多期的构造形变,山前断裂带纵向上地层层序的完整性和横向上地层的连续性受到破坏,波的传播速度横向变化剧烈,地震波场复杂。一方面静校正问题严重,单炮不经静校正处理,很难看到有效的反射;另一方面,时距曲线形状与双曲线相差甚远,地震成像困难,山前断裂带资料的品质要比盆地构造简单区低。

山前带干扰波也非常复杂,除了类型众多以外,可来自不同方向,且每一炮的干扰波特性可能有较大的变化。因此,按设计的检波器组合方式难以压制不同方向的干扰,资料信噪比低,连续的单炮记录不完全具有可比性。

复杂的地震波场使得地质学家们难以客观地描述其复杂的构造形态,基于地质模型的观测系统设计,在很大程度上将依赖于人的主观模式。根据地表产状或因构造复杂,以及软件的适应性,使得观测系统设计存在诸多不确定因素而影响资料品质。此外,山前带等复杂构造带,不仅波场复杂,还存在由于地层倾角、断层遮挡、逆掩推覆等地质因素所形成的地震反射盲区。

1.3.2.2 勘探目的层二叠系内部波阻抗差小

波阻抗界面的差异越大,反射波的振幅越强,反射特征越明显。石油钻井所揭示的上二叠统的岩性,从下到上基本为砂砾岩与砂质泥岩互层,利用柴参1井声波曲线计算地层的阻抗值(密度 $\rho = 0.31 \times v^{0.25}$),二叠系内部波阻抗差为 $0.419104 \times 10^5 \sim 0.49082 \times 10^5$,没有明显的波阻抗界面,加上三叠系的屏蔽作用,二叠系内部反射波的能量较弱,信噪比低,连续性差,尤其在盆地山前凹陷边缘及山前断裂构造带上,反射特征不明显,连续追踪困难。

1.3.2.3 埋藏深度范围变化大

山前断裂带因断层和褶皱的作用,勘探目的层横向上埋深范围变化大,甚至出露于地表,使观测系统设计变的复杂,同时产生激发问题。

山前目的层埋深的变化,孔隙所充填的流体性质会发生变化,介质的波阻抗值发生改变,而产生激发问题,特别是高阻抗岩体如碳酸盐岩接近或出露地表时,地震波的激发、接收问题变的更加突出。显然,这种地球物理特性的变化是地震工作所不希望的。

1.4 山前带地震勘探涉及的问题

准噶尔盆地南缘博格达山北缘山前断裂带地震勘探涉及的问题,包括碳酸盐岩地震勘探涉及的问题、黄土及冲积扇体地震勘探涉及的问题和山地高倾角地层(高陡构造带)地震勘探涉及的问题。

1.4.1 碳酸盐岩地震勘探涉及的问题

博格达山北缘山前断裂带,碳酸盐岩出露面积占勘探面积的 50% 左右。碳酸盐岩地震勘探属于世界性地震勘探难题。

世界各地针对碳酸盐岩的地震勘探积累了丰富的资料。不同的地震地质条件下,碳酸盐岩的地震资料品质因岩石力学特性的差异而存在差异,而碳酸盐岩地震勘探中涉及的问题却具有普遍性。具体表现在以下几个方面:

(1)能量与信噪比问题。碳酸盐岩具有较大的声阻抗,碳酸盐岩激发,纵波仅有较少的能量可以穿透碳酸盐岩,大部分能量被反射或聚焦在水平方向上传播,穿透碳酸盐岩的能量一些被折射,一些穿过较厚的地层达到碳酸盐岩底,反射和透射的纵波能量相当低,因此在碳酸盐岩底和它以下全部地层的反射波信噪比很低。

(2)强多次波问题。高阻抗差的碳酸盐岩顶底能引起的强多次波,是一种较强的干扰。

(3)强面波问题。由于大部分能量被反射到自由地表,而形成很强的面波,常淹没低振幅的深层反射波。

(4)高速差异引起的 NMO 问题及地震成像问题。大速度差异产生大的速度非均匀性,碳酸盐岩被认为是近似的 TI 介质,即各向同性水平层状介质引起的速度的各向异性问题。

(5)类似高速层顶、底界面的速度差异引起的问题。对入射波而言,在顶、底界面上的临界角很小,波穿过碳酸盐岩底层是接近垂直的,这时,从水平碳酸盐岩底下伏界面来的反射波可以透过碳酸盐岩传回地表,但当倾斜地层的反射波,或下伏地层不平行于碳酸盐岩底面的反射波超过临界角时,波全部折射或不能到达地表,这样,仅有有限角度的反射波在地表被记录,倾角的信息就会被丢掉。同时,因仅有有限的角度信息数据被记录,空间波数域的频带变窄,造成空间成像的模糊,引起在深度和空间方向的分辨率问题。

1.4.2 黄土及山前冲积扇体地震勘探涉及的问题

博格达山前带,黄土(黄土夹砾石)及山前冲积扇体的覆盖面积占勘探面积的 37% 左右。黄土及山前冲积扇体地震勘探涉及的问题包括以下几个方面:

(1)激发能量弱、资料信噪比低。黄土及山前冲积扇体,其结构松散,孔隙度大,含水性差。在松散的介质中激发,一方面,爆炸转换为弹性波能量率低,地震子波频率低,大部分爆炸能量沿地表传播或经浅层高速层折射回地表,形成强的低频面波或折射波。另一方面,地震波在松散的黄土及山前冲积扇体传播,因压密介质孔隙产生能量衰减,记录的信噪比低。

(2)静校正问题严重。松散的黄土及山前冲积扇体,与起伏的地形地貌条件,构造了山前带复杂的浅表层结构。表现为:地表高程横向变化大,范围在 500 ~ 4000m;浅表层岩性结构横向变化大,有黄土、冲积扇体、砂泥岩或碳酸盐岩等;浅表层低降速带厚度、速度横向变化剧烈,基岩裸露区低降速层厚度为 1 ~ 5m,松散的黄土及山前冲积扇体达 30 ~ 100m,基岩裸露区浅表层高速层与黄土或山前冲积扇体的浅表层高速层存在较大速度差异。基岩裸露区浅表层高速层速度在 4500m/s 左右,黄土或山前冲积扇体的浅表层高速层一般变化在 800 ~ 1500m/s。浅表层结构横向变化剧烈,其静校正问题突出。