

文章编号: 1001-1986(2010)04-0059-06

巨厚黄土地区煤田地震资料采集关键技术

陈 强^{1,2}, 常锁亮^{2,3}, 樊国强⁴, 曾维望², 田 伟², 韩雪松⁴

(1. 中国地质大学地球探测与信息技术学院, 北京 100083; 2. 山西山地物探技术有限公司, 山西 晋中 030600; 3. 中国石油大学资源与信息技术学院, 北京 102249; 4. 山西省地质工程勘察院, 山西 太原 030001)

摘要: 巨厚黄土覆盖地区土层结构疏松, 地震波速度低、吸收衰减严重、次生干扰发育, 资料信噪比与分辨率极低, 煤田地震勘探面临诸多难题, 其核心是数据采集问题。提出了利用微测井约束的瑞雷波反演技术精细刻画浅表层黄土速度结构, 合理选取激发层位; 利用震/检联合大基距组合技术提高单炮信噪比、压制低速强规则干扰; 采取低频检波器接收以适应厚黄土层中地震波传播的衰减特征; 利用多线/长排列观测技术提高目的层段的有效覆盖等技术方案。实际应用表明, 通过上述 4 项技术的集成应用, 取得了良好的效果。

关键词: 巨厚黄土; 瑞雷波反演; 低频检波器; 大基距组合; 多线/长排列接收

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.04.014

Research on key techniques for coalfield seismic data acquisition in thick loess area

CHEN Qiang^{1,2}, CHANG Suoliang^{2,3}, FAN Guoqiang⁴, ZENG Weiwang², TIAN Wei², HAN Xuesong⁴

(1. Geodetection and Information Technology Institute, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Shanxi Shandi Geophy-Tech Co., Ltd, Jinzhong 030600, China;

3. Resources and Information Technology Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

4. Engineering Geology Survey Institute of Shanxi Province, Taiyuan 030001, China)

Abstract: Complicated conditions in thick loess-covered area cause many serious problems to the coal field seismic prospecting, which is characterized with loose soil structure, lower wave velocity, severe absorption and attenuation, serious secondary disturbances, extremely poor S/N ratio and resolution. Among these problems, field acquisition techniques are the key problems. So, some solutions are proposed, including: (1) fine portraying the loess velocity structure using Rayleigh-Wave inversion method restrained by micro-logging data, to reasonably select the excitation location; (2) applying long excite/geophone array to enhance S/N ratio of raw data and suppress the strong low speed regular interfaces; (3) adopting the low frequency geophones in order to adapt the propagation attenuation characteristics of thick loess; (4) using the multi-lines and long layout observation to improve the effective folds for targeted coal seam. The full-scale test in the thick loess area of Wanrong and Hongdong county in Shanxi indicated that through the system and comprehensive application of the above 4 key techniques, the reflection wave can be clearly recognized from raw records, and the seismic stack-profiles with events of high S/N ratio, good continuity can be obtained. The geological results have been proved perfect by 3 wells data. The application of these key techniques will basically solve the technical problems which coal field seismic acquisition work has faced in the similar areas with thick loess.

Key words: thick loess; coalfield seismic exploration; Rayleigh-wave inversion; low frequency geophone; long excite/geophone array; multi /long line layout

我国黄土分布广泛,面积约 $63.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要分布在北纬 $34 \sim 45^\circ$ 之间黄河中下游的陕西北部、甘肃中部和东部、宁夏南部和山西中西部等广大地区^[1]。在黄土地区蕴藏着丰富的油气、煤炭、煤层气资源。然而由于巨厚黄土层土质结构松散,地震波速度低,吸收衰减严重,浅层折射、面波、鸣震、多次

波等强干扰非常发育,地震资料信噪比与分辨率极低,是地震勘探面临的一大难题。

近年来油气勘探领域围绕巨厚黄土地区的地震勘探技术开展了大量的研究,取得了一些突破与进展^[2-10]。但相对于油气勘探,煤炭和煤层气资源由于勘探深度一般浅于 1 500 m,煤层反射波更容易受

收稿日期: 2009-11-30

作者简介: 陈 强(1972—), 男, 山西灵石人, 工程师, 博士研究生, 从事煤炭煤层气地震勘探技术研究与应用。

到二次鸣震、面波等强干扰的影响，地震勘探难度更大。虽然广大技术人员通过持续不懈的努力，也提出了一些技术措施^[11-15]，但至今仍未获得系统的实质性突破，严重制约了地震勘探技术在这些地区的推广与应用。

巨厚黄土地区煤田地震勘探面临的主要难点是数据采集问题，必须通过研究影响激发、接收条件的关键因素，设法获得具有一定信噪比的原始资料，保证煤层反射有效成像。因此，在巨厚黄土层中寻找与选择适当的激发层位，选取有效的激发方式，保证在强吸收介质条件下激发出足够能量的地震波是地震勘探首先要解决的问题；其次，针对巨厚黄土的强吸收作用导致的高频衰减严重和面波、鸣震、多次波等强干扰发育，资料信噪比极低等问题，如何选取合理的接收参数、提高目的层段的有效覆盖也是资料采集中必须解决的问题。

为此，本文从激发与接收因素两方面入手，在讨论了黄土层的结构特征及其对地震波影响的基础上，提出了利用微测井约束的瑞雷波反演技术精细刻画浅表层黄土速度结构，合理选取激发层位；利用震/检联合大基距组合技术压制低速强规则干扰、提高单炮信噪比；采取低频检波器接收以适应厚黄土层中地震波传播的衰减特征；利用多线/长排列观测技术提高目的层段的有效覆盖等技术方案，解决巨厚黄土覆盖地区煤田地震采集难题。

1 巨厚黄土层的结构特征及激发井深选取方法

大量勘探实践表明，速度较高的地层(如含水层位、微风化基岩、胶泥土层等)是地震勘探的有利激发层位。由于黄土具有高孔隙度、低密度、低速度、强吸收等特征，整体而言黄土层属于地震勘探的不利激发层位。然而黄土研究表明^[16-18]，第四纪古气候至少发生了 37 次冷暖交替变化，不同的古气候环境形成了不同成分的黄土沉积层，表现为在垂向上具有明显的差异沉积现象，在巨厚黄土地层往往存在红色第四系古土壤胶泥夹层，这些胶泥夹层的黏土矿物含量、含水饱和度和密度相对较高，对地震波的吸收较弱，属于相对有利的激发层位。图 1 所示为在山西洪洞巨厚黄土区同一位置的不同性质黄土分层中激发获得的单炮记录。在该激发点的 50 m 深度范围内，在 9~12 m 和 20~25 m 段，存在一些具有一定厚度的红色胶泥夹层，可以看出在这 2 个深度范围内激发获得了可以识别煤层反射的原始资料。对比表明：在巨厚黄土地区，地震资料的品质与激发层位的选择密切相关，而如果激发层位选择不当，仅靠增加激发井深对资料品质的改善作用并不明显。因此，如能在巨厚黄土层中找寻和划分出这些古土壤胶泥薄层作为激发层位则是改善巨厚黄土地区激发效果的有效途径。

通常用小折射、微测井等方法进行浅表层结构调查，但由于小折射方法存在只适用于相对简单的

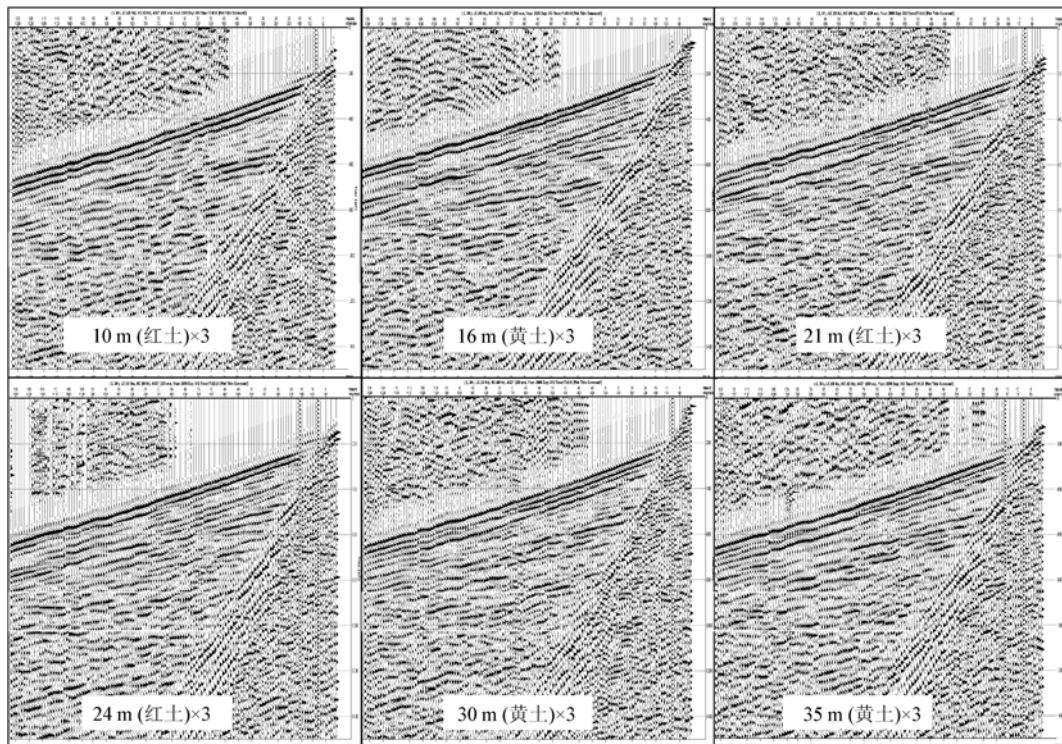


图1 巨厚黄土地区同一位置不同激发层位的原始记录对比

Fig. 1 The raw records of different excitation layer at the same point

地形和下部地层速度高于上部地层速度的情况,且垂向分层精度较低等缺点;而微测井法虽然精度高,但存在只能对测井点进行详细分层且成本较高的缺点,难以适应巨厚黄土地区低速层厚度大、相对高速的古土壤胶泥夹层厚度薄且深度多变的特点。为此,基于巨厚黄土地区瑞雷面波极为发育,而利用瑞雷波的频散特性可以反演出地层横波速度且具有较强分层能力的特点,提出了在测线上采用一定间隔的深井密集取心和微测井获取黄土地层岩心与纵波速度的统计关系作为控制点,利用微测井约束多道瞬态瑞雷波反演建立黄土地层的纵波速度与横波速度的统计关系,然后沿测线逐点进行瑞雷波反演,最终得到有利激发层位的深度、厚度分布情况

的精细表层结构调查方法,为激发井深的选取提供依据。

图2为在山西万荣巨厚黄土区沿测线利用微测井约束,采用4.5 Hz低频检波器连续接收的瞬态瑞雷波法浅表层纵波速度剖面。可以看出,在该剖面上60 m以浅,黄土具有明显的分层特征,随黏土含量、含水性以及压实度的不同,纵波速度变化特征明显:在30 m深度以浅,黄土层速度介于300~700 m/s之间;40~60 m之间黄土层速度也较低,600~800 m/s,其间夹有一速度约800~1 200 m/s的相对高速夹层,该夹层在横向上沿测线分布较稳定,为野外采集中激发井深的选择提供了依据。依此确定激发井深的实际采集效果也表明了上述方法的有效性。

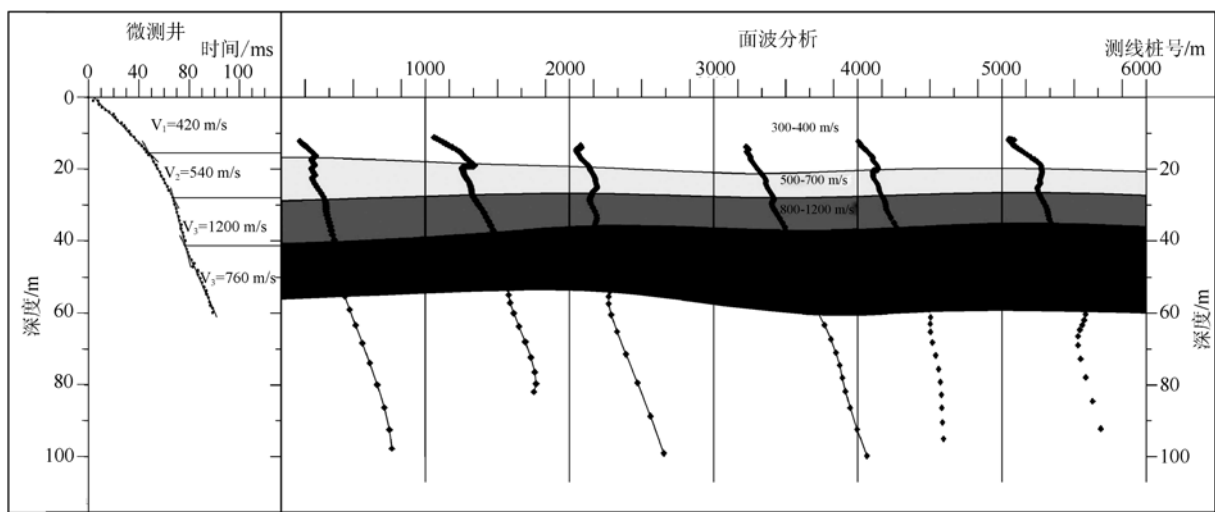


图2 利用微测井约束瑞雷波反演法获得的厚黄土地层浅部速度结构剖面图

Fig. 2 The loess velocity structure profile obtained using Rayleigh-Wave inversion restrained by micro-logging data

2 巨厚黄土地区煤田地震资料的波场特征及震/检联合大基距组合压噪技术

巨厚黄土地区地震资料波场复杂,干扰波极为发育。采集中必须认真研究各主要干扰波产生的机理及发育规律,分析干扰波与煤层反射波在传播速度、频谱分布等方面的差异,采取相应措施予以压制。

图3所示为在黄土层内激发的一张典型黄土地区地震记录。可以看出,虽然对激发层位进行了优选,但记录中面波、黄土鸣震、浅层折射及其多次波等能量强、衰减慢的规则干扰仍非常发育,为巨厚黄土地区的主要干扰波。其中,面波主要沿地表传播,视速度一般在300~800 m/s、频率主要分布在10~60 Hz,具有较强的频散现象;黄土鸣震主要由地震波在激发点到地表间的多次震荡产生,其到达时间由激发井深度和其上部地层速度决定,其时距曲线形态与初至波平行;浅层折射及其多次波由地震波在高速层顶及黄土层的顶底界面间的传播及震

荡产生,其到达时间由黄土层深度与速度决定,频率和能量与一次波很接近,速度较高,一般为在1 800~2 500 m/s。而来自地下煤层等目的层的有效波一般具有较高的线性视速度,能量较弱的特点,加之煤田勘探的目的层深度一般较小,煤层反射波往往淹没在这些强干扰发育区域,难以识别。

众所周知,野外组合法对具有方向传播特性的低速规则干扰具有很好的压制作用,在油气勘探中得到了广泛应用,而在煤田勘探领域由于受勘探投入限制,以及由于煤层反射系数大,多数地区不利用组合技术也可获得高信噪比资料等多种因素的影响,实际生产中组合技术并未受到应有的重视与应用。基于巨厚黄土地区主要干扰波能量强、视波长分布范围大和煤层反射弱、线性视速度高的波场特征,提出了利用大基距的震源组合/检波器组合联合压制巨厚黄土地区强规则干扰、增强地震反射波能量、提高资料信噪比的野外强化组合压噪的技术思路。

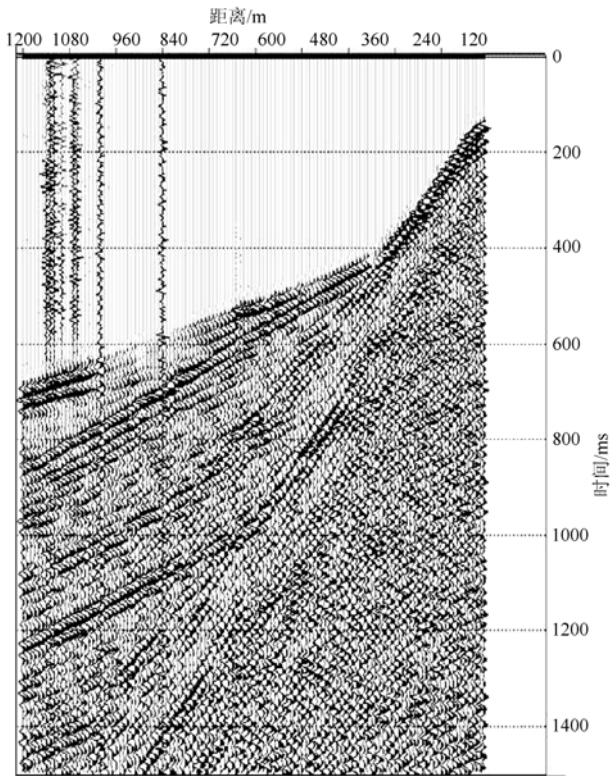


图 3 巨厚黄土地区典型记录(88 m、4 kg)

Fig. 3 Typical single-shot field record in thick loess area

图 4 为山西洪洞厚黄土区同一位置不同组合参数情况下的试验对比记录。可以看出，单井激发、检波器堆放(图 4a)时，面波、低速线性干扰极为发育，几乎看不到煤层反射波；进行激发(接收)组合或组合基距较小时(图 4b)，干扰波受到了一定程度的压制；而采取震/检联合大基距组合(图 4c)时，记录面貌得到了明显改善，获得了可靠识别的煤层反

射波。试验效果充分说明了在巨厚黄土地区进行震/检联合大基距组合的有效性和必要性。

3 巨厚黄土层地震波衰减特性及低频接收响应技术

黄土层对地震波的吸收衰减严重,有关研究表明^[10],黄土层的品质因数一般在 15 左右,而下伏中生界地层品质因数一般在 170 左右,黄土层对地震波的吸收约为深层地层的 100 倍。此外,黄土层对地震波不同频率成分的吸收衰减强度也不相同。图 5 为利用洪洞黄土区微测井资料计算得到的地震波不同频率成分随黄土层厚度的衰减曲线。可以看出,随着黄土层厚度的增加,地震波有效频带变窄、频率降低,有效频带范围内的各频率成分的振幅衰减。增大,高频成分的衰减强度远远大于低频成分,表明黄土地层具有极强的低通滤波特性。因此,在接收因数选取时必须考虑到巨厚黄土地区地震波传播的这一特点,最大程度的进行响应匹配。

以往受仪器动态范围较小,去噪处理技术水平的限制以及“高分辨率必须高频检波器接收”等观点的影响,在煤田地震勘探中存在反对采取低频检波器接收的倾向,一般选用 60 Hz 甚至更高主频的检波器接收。上述分析表明,高频检波器接收不能较好的适应巨厚黄土地层中地震波的传播规律,而低频检波器的通放带较宽且对低频信号的压制较弱,为此,在巨厚黄土地区煤田地震勘探中应最好选用数字化检波器或低频检波器接收。图 6 的实际试验资料也表明了巨厚黄土地区采取低频检波器接收的必要性。

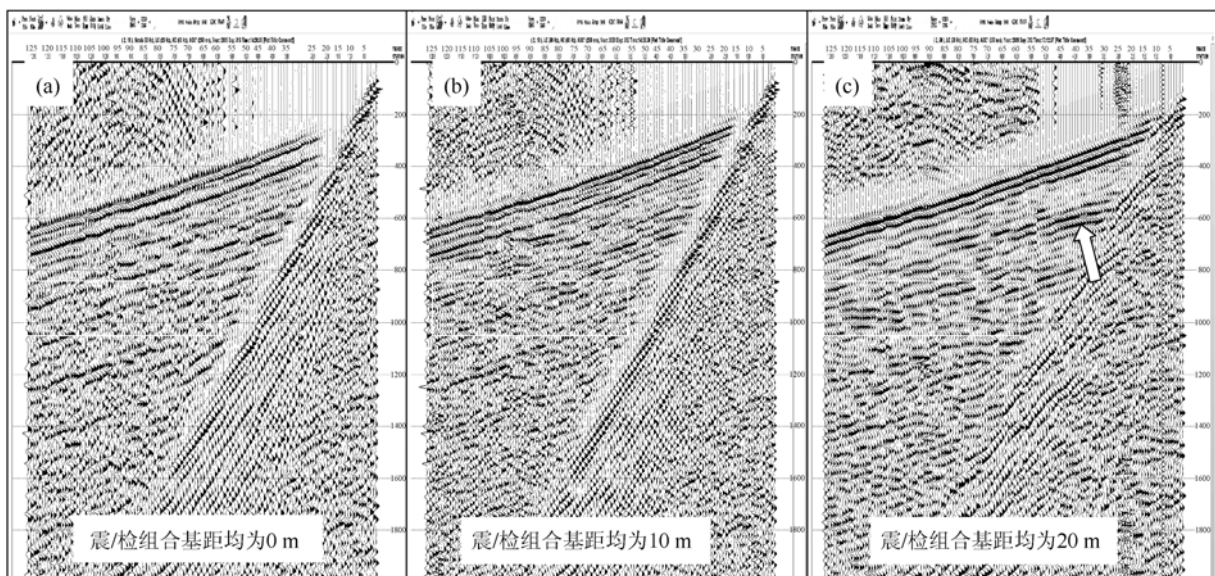


图 4 山西洪洞厚黄土区同一位置不同组合基距的试验对比记录

Fig. 4 The test records with different array at same point in Hongtong, Shanxi (21 m × 3井 × 2 kg 激发、12只 10 Hz 检波器接收)

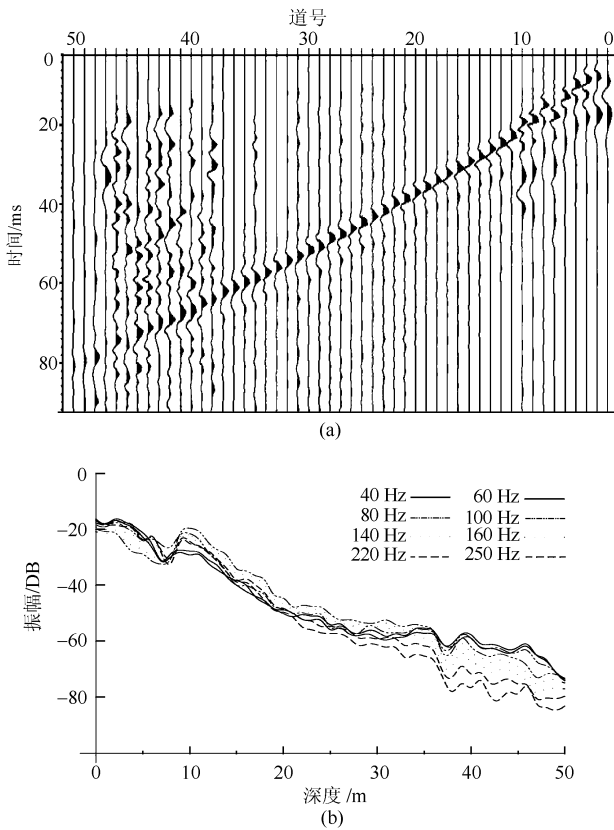


图 5 黄土层微测井记录(a)及地震波不同频率成分随深度的衰减曲线(b)

Fig. 5 Loess micro-logging record (a) and attenuation curves of different frequency components with depth (b)

4 巨厚黄土地区单炮的信噪比及多线/长排列观测

巨厚黄土地区地震资料的信噪比往往极低。就采集而言,地震勘探的成像效果很大程度上由单炮的信噪比和目的层段的照明度所决定,因此采集中

除努力提高单炮信噪比之外,还应通过优化观测系统提高目的层段的有效覆盖次数。为此,提出利用多线/长排列接收的观测系统实现大幅提高有效覆盖次数的技术解决方案。

受强能量低速干扰影响,巨厚黄土地区煤层的有效反射波往往在较大的偏移距段才能与强干扰分离开,在采集中应适当加长接收排列长度以增加有效反射波的接收窗口。实践表明,巨厚黄土地区的最大偏移距一般选取为最深目的层深度的 1.5~2 倍为宜;多线观测则是借鉴三维观测的思路,采用单炮多线或多炮多线的接收方式^[7-9]。该观测方式既可以利用横向多次覆盖压制侧面波和散射等干扰,突出有效信号的能量,又可以通过横向面元组合叠加大幅度提高浅中深层有效覆盖次数,提高资料信噪比。多线观测时,接收线数、线间距的选择应遵循组合原理进行计算。

5 应用实例与效果

山西省万荣-临猗找煤区为黄土台垣地貌,黄土厚度变化从 200 m 到 400 m 不等,潜水位深度超过 180 m,主要煤层埋藏 600 m 左右,为典型的巨厚黄土覆盖地区。在以往的常规采集方法试验中没有获得煤层反射波。

为解决本区采集技术难题,通过上述 4 方面对激发、接收因素进行了系统地研究与论证后,确定了本区的采集参数:在由瑞雷波反演确定的相对高速黄土层内逐点选取激发井深以 20 m 基距的 3 井线性组合激发;采取 12 只 10 Hz 低频检波器以 20 m 基距的线性组合接收;采取 1 炮 3 线单线 128 道、道距 10 m、线距 10 m、炮距 40 m、覆盖次数可达 96 次(依 10 m 面元计)的观测系统完成了本区的地震采集工作。

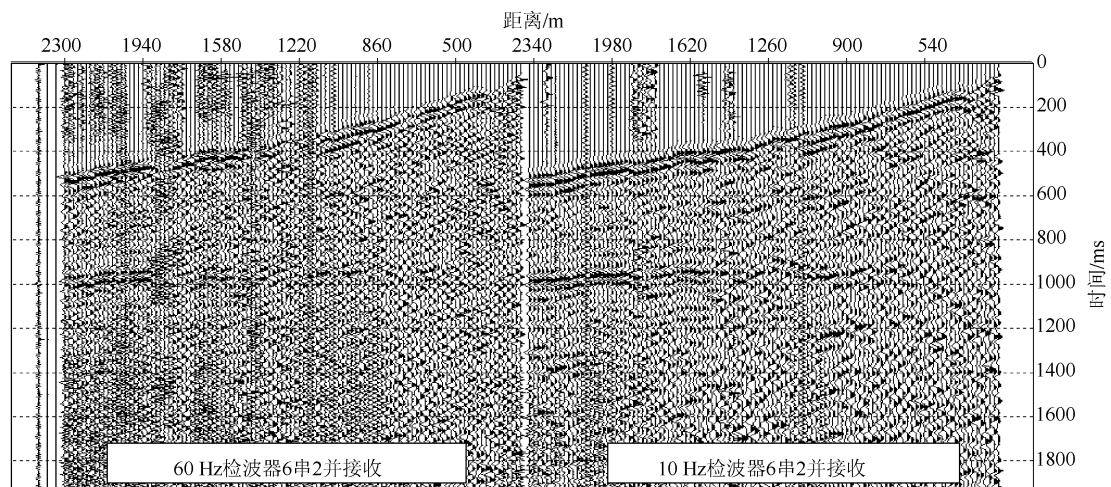


图6 厚黄土地区不同主频检波器接收的原始资料对比

Fig. 6 The test records with different geophones at same point in thick loess areas (16 m(古土壤)×5 井×2 kg 激发、震源组合基距为 40 m、检波器组合基距 20 m)

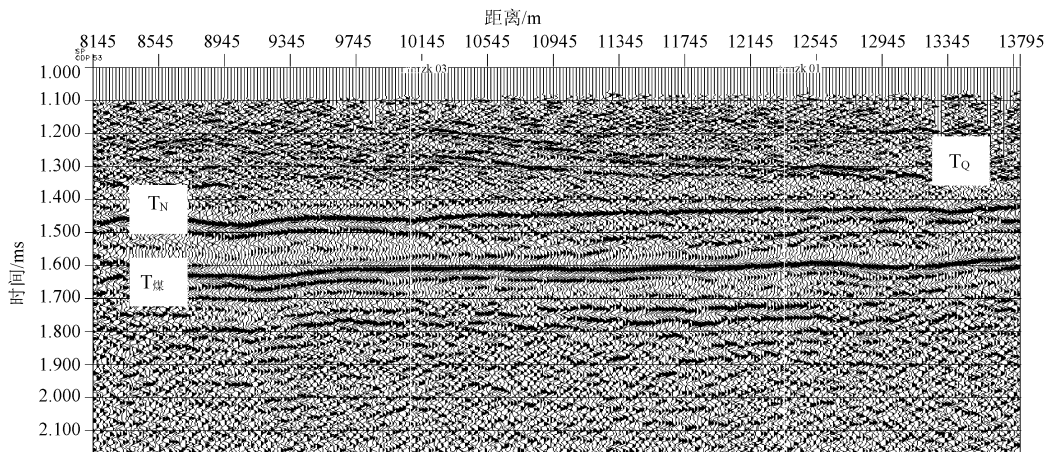


图7 本次采集获得的初叠时间剖面

Fig. 7 Raw-stack time profile obtained by our acquisition method

对采集资料精心处理后，获得了煤层反射波清晰、信噪比高、连续性好的叠加剖面(图 7)，解释确定了研究区煤层的分布范围与埋深。解释成果经 3 口钻孔验证，均钻遇煤层且最大相对误差小于为 3%，取得了良好的地质效果。

6 结论

针对巨厚黄土地区煤田地震采集中面临的技术难题，从激发层位选取、增强激发能量、干扰波压制、接收方式、观测系统等方面系统地提高单炮信噪比和有效覆盖次数进行了讨论与试验研究，并得出了以下基本认识。

a. 巨厚黄土层地区煤田地震资料采集难度大，需要对激发与接收因素进行全面、系统地分析论证，仅靠改善其中某一或某些方面难以取得理想的效果。

b. 有利激发层位的选取对巨厚黄土层覆盖地区的地震采集极其重要。微测井约束多道瞬态瑞雷波反演技术是找寻与选取有利激发层位的有效手段之一。在此基础上，应用大基距震/检联合的组合强化技术对压制厚黄土层覆盖地区的规则强干扰、增强地震波下传能量、提高单炮信噪比效果显著。

c. 为适应厚黄土层中地震波传播的衰减特征，在巨厚黄土地区煤田地震勘探中选用数字化检波器或降低检波器主频接收和采取多线/长排列接收的观测系统有利于提高单炮的信噪比和浅中深层目的层有效覆盖次数，对改善剖面品质效果明显。

参考文献

[1] 滕志宏. 黄土高原黄土地层分区及其地层结构[J]. 西北大学学报, 1990, 20(2) : 85-93.
 [2] YIMOU L, JUYONG Y, XIANGHAO L. Seismic acquisition

techniques in complex mountainous areas : Case study in Kuqa foreland basin, western CHINA[C]//US : SEG Las Vegas 2008 Annual Meeting, 2008 : 139-143.

[3] 程洪涛, 黄用勤. 黄土塬地区地震勘探激发技术研究[J], 工程地球物理学报, 2005, 2(6) : 460-465.
 [4] 黄桂雄, 张宝君. 富县黄土塬区二维地震直测线施工方法及效果[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008, 23(4) : 15-25.
 [5] 姚宗惠, 杜中东, 王学刚, 等. 鄂尔多斯西缘前陆盆地巨厚黄土地区地震采集技术[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4) : 406-412. 刘依谋, 梁向豪. 塔里木盆地西南拗陷巨厚黄土区地震采集技术[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(2) : 103-105.
 [6] 孙景旺, 杜中东, 任文军, 等. 鄂尔多斯盆地黄土塬区多线地震采集技术[J]. 石油物探, 2003, (04) : 5-8.
 [7] 罗仁泽, 梁黎明, 吴希光, 等. 宽线大组合理论及其在黄土塬地震采集中的应用[J]. 天然气工业, 2009(3) : 54-56
 [8] 郭红启, 林明强, 陆昌平, 等. 民和盆地黄土塬区地震采集技术[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(增刊 1) : 1-4.
 [9] 赵延江. 黄土塬地区地震勘探激发技术探讨[J]. 石油物探, 2006, 45(6) : 646-650.
 [10] 曹新领, 张奋轩. 用测井方法确定最佳激发层位[C]. 西安 : 陕晋冀煤炭学会地质测量专业学术研讨会, 2006 : 102-103.
 [11] 王文忠, 田雪峰, 梁延广, 等. 地震勘探弯线技术在巨厚黄土塬区沟谷条件下的应用[J]. 中国煤炭地质, 2007(6) : 69-73.
 [12] 王中锋, 冯西会, 朱芳香. 黄土塬梁峁区三维地震采集方法研究[J]. 中国煤炭地质, 2008(6) : 28-30.
 [13] 常锁亮, 李连英, 张胤彬, 等. 厚黄土覆盖丘陵地区煤田地震勘探方法研究[J]. 物探与化探, 2002, 26(6) : 17-20.
 [14] 王伟, 曹志勇, 杨德义, 等. 黄土塬区特殊观测系统的设计及应用[J]. 太原理工大学学报, 2008(增刊 2) : 22-24.
 [15] 丁仲礼, 刘东生, 刘秀铭, 等. 250 万年来 37 个旋回[J]. 科学通报, 1989, 34(19) : 1494-1496.
 [16] 岳应利. 黄土物理性质变化规律研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2000, 28(02) : 99-103.
 [17] RYASHCHENKO T G, AKULOVA V V, SOLOKOV V N, 等. 中国北方黄土高原地区黄土的微结构模型(详细摘要)[J]. 西北地震学报, 1999, 21(1) : 110-111.