

二维地震勘探中多次波分步压制方法应用研究

张 宪 旭

(中国煤炭科工集团西安研究院有限公司 陕西 西安 710077)

摘要:为探索煤田多次波的有效压制方法和流程,提高地震资料对含煤盆地整体成像质量,采用模型数据为先导,结合测井数据对内蒙古某煤矿的二维地震数据所包含的多次波特点进行分析,对当前比较成熟的2种多次波压制方法的适用性进行了试验。结果表明:在叠前使用Radon滤波法对长程多次波进行衰减,叠后使用基于波动方程的预测相减法对短程多次波进行压制,可以取得较好的成像效果。因此,为消除多次波对构造成像的影响,应采用的方法是:首先对数据中所包含的多次波进行识别和分类,再依据不同种类多次波的特点,结合压制方法的优缺点,在叠前和叠后分步识别和压制,是取得高质量地震剖面的有效途径。

关键词:多次波; Radon滤波; 预测滤波; 煤田勘探

中图分类号:P641.8 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2016)04-0135-05

Application study on split-step suppression method of multiple waves in two dimension seismic exploration

Zhang Xianxu

(Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to search an effective suppression method and procedure of the multiple waves in coalfield and improve the integrated image quality of coal-bearing basin by seismic information, with model data as a guide and in combination with the logging data, an analysis was conducted on multiple wave features included in the two dimension seismic data of a mine in Inner Mongolia and in combination with the multiple wave suppression method, an experiment was conducted on the adaptability. The results showed that before the pre-stack, the Radon Filter method was applied to the attenuation of the long distance multiple waves and after the post-stack, the prediction minus method based on the wave equation was applied to the suppression of short distance multiple waves with a well image effect obtained. Therefore, in order to eliminate the multiple waves affected to the tectonic image, the methods to be applied should be that the identification and classification should be firstly conducted on the multiple waves included in the data, then according to the different type multiple wave features, in combination with advantages and disadvantages of the suppression method, before pre-stack and after the post-stack, the split-step identification and classification would be the effective access to have the high quality seismic cross section.

Key words: multiple waves; Radon Filter; predicted filter; coalfield exploration

0 引言

以往煤田地震勘探的目的层是煤层,其核心是煤层的成像和解释^[1]。随着煤矿开采的不断深入,开采难度越来越大,煤层围岩导致的各种问题也越

来越突出,如顶底板突水、底板岩爆和陷落柱等。因此,迫切需要地震勘探能为含煤盆地的整体构造和煤层围岩提供准确成像,为灾害预测和防治水决策提供依据^[2-4]。对于煤田地震勘探,一般煤层上覆地层能取得较好的成像效果,但下伏地层成像难度

收稿日期:2015-12-15;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2016.04.027

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05040-003);“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAK04B04);中国煤炭科工集团西安研究院技术创新资助项目(2014Z1009)

作者简介:张宪旭(1979—),男,陕西宝鸡人,工程师。Tel:13759930961,E-mail:zhangxianxu@cctegxian.com

引用格式:张宪旭.二维地震勘探中多次波分步压制方法应用研究[J].煤炭科学技术,2016,44(4):135-139.

Zhang Xianxu. Application study on split-step suppression method of multiple waves in two dimension seismic exploration [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 135-139.

较大。其主要原因有：首先，煤层对地震波具有强烈的屏蔽作用，导致深部反射能量很弱。其次，煤田多次波较发育，对深部地层的反射具有强烈的遮蔽作用。其中多次波对成像效果影响更大些，严重时会导致构造假象^[5]。当前对多次波的压制方法，主要分为滤波法和预测法2种，但是两者在使用过程中都有一定的局限性。对于滤波法，由于在具体施工过程中，受限于勘探成本，一般接收排列长度偏短，限制了其压制效果。对于预测法，由于其较高的计算成本，在实际数据中的应用也受到一定程度的限制^[6-7]。笔者从煤田地震特点出发，结合滤波方法和预测方法两者的优势，对煤田地震资料中多次波的压制方法的应用进行了探索和尝试。

1 多次波压制方法的基本理论

当前比较成熟的多次波压制方法大致分为2大类^[8-10]：一类是基于信号处理的滤波方法，该方法主要包括F-K滤波、Radon滤波和聚束滤波法等^[11-12]；另一类是基于波动方程的预测相减法，如波场延拓法、反馈迭代法和逆散射级数法等^[13]。

滤波方法是利用反射波和多次波之间速度的差异压制多次波的方法。例如Radon滤波法的基本思想为：首先，对数据做Radon正变换，将数据变换到 $\tau-p$ 域内。然后，利用反射波和多次波的速度差异，在 $\tau-p$ 域内各自能量分布在不同区域的特性，选择合适的滤波器对多次波能量进行压制。最后，将滤波后的数据做Radon反变换，反变换回到时空域内完成对多次波的压制。当地下介质情况不太复杂，速度梯度为正，且有较大的NMO速度差异时，Radon滤波法是一种计算效率高，且较为有效的多次波压制方法。但对于构造复杂时，其精度相对较低，难以获得满意的压制效果。

基于波动方程的多次波压制方法的基本原理为：利用模型驱动或者数据驱动对多次波进行预测，根据预测波场将多次波从原始数据中自适应减去，完成多次波的压制^[14]。基于波动理论的多次波压制方法考虑了复杂的波场传播效应，计算精度高，但是计算效率低，且该方法对处理的数据要求比较高，需要对数据进行严格的规则化，这些条件限制了该方法的实际应用。

当今也有学者通过研究试图结合2种方法的优点，提出联合应用波动方程预测的反馈迭代法和Radon变换滤波，在双曲Radon域比较分析原始数

据和预测多次波，设计合理有效的自适应滤波器，在Radon域进行多次波的粗略预测，在时空域相减得到压制结果^[15]。但是该方法还处于模型测试阶段，尚未见到实际应用效果。

2 多次波的识别和分步压制方法

2.1 煤田地震特点

在煤田地震勘探中，对于多次波压制方法来说其优势为：①煤田地震勘探的深度都不大，一般在1 000 m以内，勘探深度内速度梯度变化较大，浅层发育的多次波比较容易识别和压制；②煤田地震勘探区域相对较小，钻孔密度和地质背景资料相对丰富，而且随着矿井的开采，有很多地质情况都得到直接验证；③煤层与围岩的阻抗差大、反射能量强，煤层成像受到多次波影响小。

煤田地震勘探的劣势为：①煤田地震勘探属于陆地勘探，资料易受到地表起伏、低降速带厚度变化、地表松散层对地震波强烈吸收作用以及噪声（环境噪声、面波和声波）等因素的影响，增加了多次波的识别和压制难度；②煤层对地震波能量具有强烈的屏蔽作用，煤层下部的地层反射能量通常比较弱，多次波识别和压制难度都大；③受到施工成本的限制，煤田地震勘探施工排列相对短，偏移距不足，多次波和反射波由于速度差异带来的时间差异很小，大幅限制了滤波方法对多次波的压制效果；④煤层的速度比围岩速度低，如果煤层较厚，地层速度局部会出现倒转的现象，滤波方法应用受限。

2.2 分步识别和压制

在实际应用中，不能期望只靠一种方法或者在一个环节中将多次波压制干净，而需要在处理过程中，根据不同的数据状态，结合地质特点，尽量发挥压制方法的优势规避劣势，在数据处理的不同阶段对多次波进行压制，从而达到有效压制多次波的目的^[16]。

2.2.1 叠前识别和压制

在对地质背景掌握的情况下，选择在叠前使用计算效率较高的Radon滤波法，通过精确的速度拾取，对以下2种情况的多次波做有效压制。①与反射波速度差异较大的多次波；②与反射波在时间域上有一定间距的多次波。由于这2种多次波与反射波能在速度上明显区分开或在时间上间隔比较大，压制难度最低，使用Radon滤波可以取得较好的压制效果。

2.2.2 叠后识别和压制

在叠后, 主要的压制目标是层间多次波。在叠后, 由于数据量显著减小, 基于波动方程的多次波压制方法所花费的计算量会大幅降低, 使得在实际数据应用中成为可能。预测相减法不受时空的限制, 对叠前不好压制的多次波能取得较好的压制效果, 是对叠前压制方法的一个补充^[17] 其要点为: ①确保浅层精确成像, 使得预测模型构建准确; ②结合地质和钻井资料进行多次波的识别, 由浅到深逐层压制; ③结合地质资料和偏移效果判断压制效果。

3 二维地质模型应用效果

为了验证方法的可行性和使用效果, 首先构建二维地质模型(图1)。模型共包含17层, 1~15层为水平层, 16和17层有一定的构造起伏, 15层厚度变化最剧烈, 地层厚度最大118 m、最小5 m。模型的总体波速变化范围为800~4 000 m/s, 其中8、10、12、14层模拟的是煤层, 其波速为2 200 m/s, 其围岩(7、9、11、13和15层)波速为3 100 m/s, 第17层波速为3 400 m/s, 第18层波速为4 000 m/s; 模型总宽度为2 500 m, 深度为800 m。在该模型上模拟生成75炮数据, 每炮排列为95道接收, 中点放炮, 子波主频为60 Hz, 道距为10 m, 炮距为20 m。

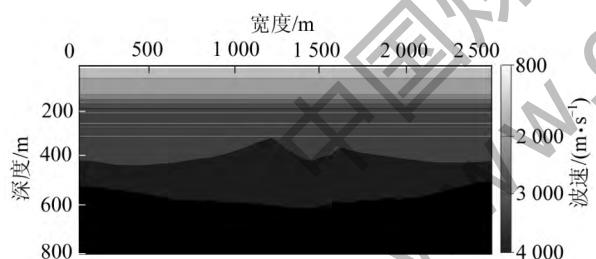


图1 二维地质模型

Fig. 1 2D geological model

根据模型的物性参数可知, 其主要反射层位为: 3、6、8及10—12层(称复合层)和14层, 在数据中分别位于50、125、175、205和240 ms。多次波主要发育在地表与这几层之间、层与层之间以及其他的方式组合。根据地层的深度、速度以及多次波的周期特性可以推算出, 对第16层(240~320 ms)和第17层(375~420 ms)反射有影响的多次波主要为: 3、6、8和10—12复合层与地表发育的表面多次波8、10、12和14层之间的层间多次波, 以及其他多阶多次波。从图2中单炮、速度谱和CDP道集可以看出, 相对于这些多次波能量, 第16和第17层的反射能量非常弱, 深部反射能量的识别和成像都非常困难。

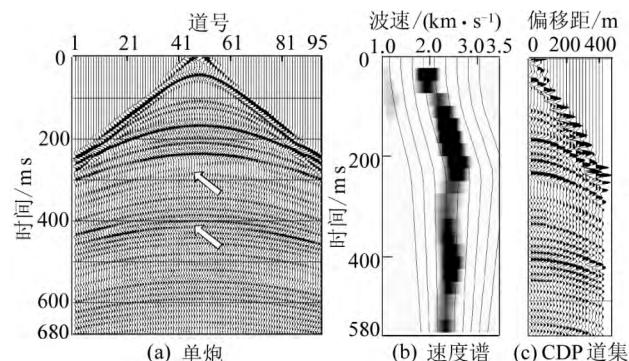


图2 模型原始单炮、速度谱和CDP道集

Fig. 2 Model of raw shot, velocity spectrum and CDP gather

首先, 在叠前使用Radon滤波法, 针对长程多次波和反射间隔较大的多次波进行压制。压制效果如图3所示, 单炮和CDP道集多次波的绝大部分能量已被压制, 16和17层的反射在局部已经可以看出。在速度谱中可以看出: 长程多次波的能量基本被压制, 反射能量团显现出来, 速度变化趋势正常。

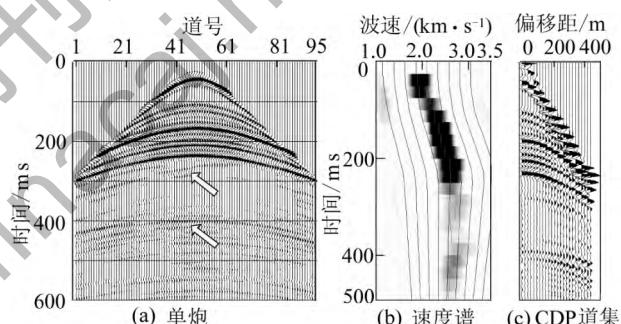


图3 模型多次波压制后单炮、速度谱和CDP道集

Fig. 3 Model of shot, velocity spectrum and CDP gather before multiple suppression

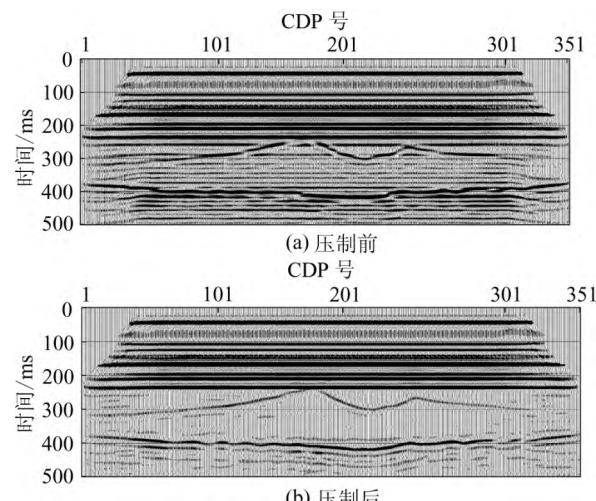


图4 多次波压制前、后模型偏移模型

Fig. 4 Model of migration section before and after multiple suppression

在叠后,使用基于波动方程的预测法对残余多次波能量进行压制。使用已经成像好的水平反射为多次波的数据驱动区域,用于建模和自动识别,对230~500 ms作为多次波预测相减区域。从图4的压制效果对比可以看出:层间发育的微曲多次波被很好地压制,第16和17层的构造接触关系成像效果比较满意。

4 实际数据应用效果

实际数据使用2004年在内蒙古某矿区施工的一条二维测线,勘探区位于一个独立含煤盆地,其基底由侏罗系火山岩构成。勘探区内地层从深到浅分别为:中生界侏罗系、白垩系、新生界新近系和第四系。盆地内共赋存16层煤,总厚度42.80 m;测线沿盆地长轴直线布置,长度为8.6 km,物理炮数为608炮,每炮95道接收,检波器道距10 m。勘探区内地表条件较好,主要为草原覆盖,线上高程相对高差7 m。2004年处理目标为煤层成像,本次目的为针对多次波压制后,对煤层下部地层进行成像。

虽然勘探区的地表条件简单,但地下构造复杂,煤层数多,地震资料中多次波非常发育。从图5中单炮、速度谱和CDP道集可看出,煤层内部的层间多次波所占比例最大,对300 ms以下的反射能量遮蔽非常严重。从2004年的处理结果(图6)中可以看出,浅部地层成像较好且部分基底成像比较清晰,但盆地最深的地层基本被多次波能量掩盖,无法有效识别。

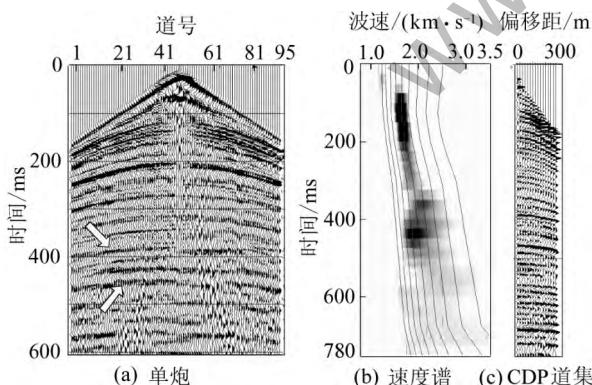


图5 多次波压制前单炮、速度谱和CDP道集

Fig. 5 Shot, velocity spectrum and CDP
gather before multiple suppression

首先,根据之前的地震资料以及后来搜集到的过测线的9口钻孔,构建出盆地的整体地层大致构造(图7),为后续处理提供多次波识别和压

制依据。

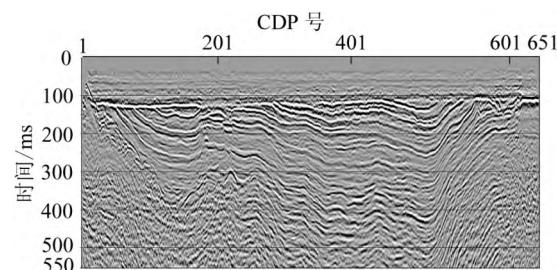


图6 2004年处理的偏移剖面

Fig. 6 Processing of migration section in 2004

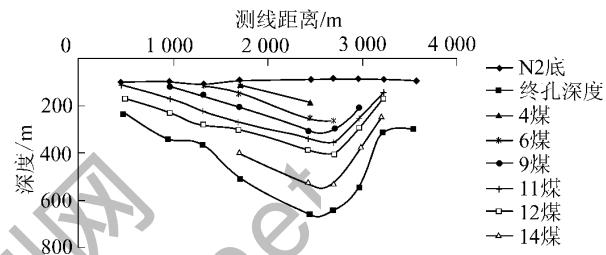


图7 利用井数据构建的盆地构造

Fig. 7 Using well data to construct basin tectonic

在叠前,通过反射速度的精确拾取,在叠前使用Radon滤波法对数据进行压制。压制效果如图8所示,从单炮数据也可以较明显地看出:深部被多次波遮蔽的反射同相轴显现出来,速度谱上300 ms以下的反射能量团速度变化趋势正常。

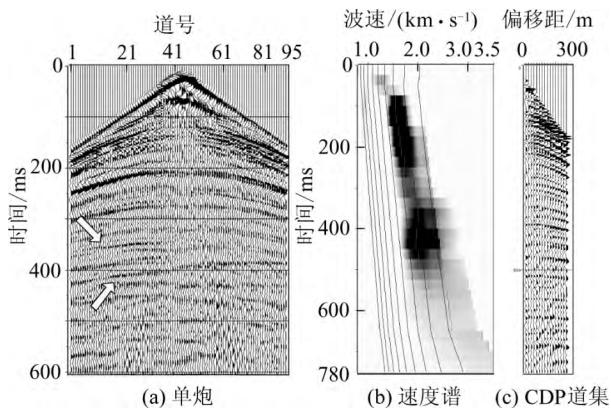


图8 多次波压制后单炮、速度谱和CDP道集

Fig. 8 Shot, velocity spectrum and CDP
gather after multiple suppression

在叠后,使用预测相减方法对叠前无法压制干净的多次波进行衰减,压制效果如图9所示。对比图6与图9所示看出,经过多次波衰减后,被多次波遮蔽的盆地基底得到了较好的成像,真实地还原了地下实际构造。

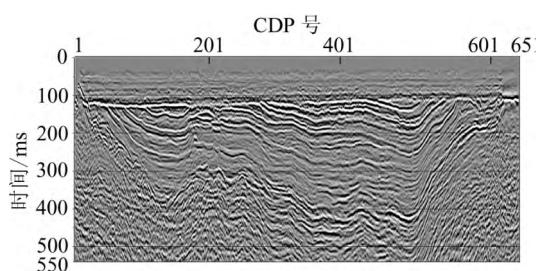


图9 多次波压制后的偏移剖面

Fig. 9 Migration section after multiple suppression

5 结语

含煤盆地中,多次波非常发育,严重影响了深部地层成像质量。在煤田地震数据中,由于其地质特点和施工限制,多次波的识别和压制的难度较大,需要将地质资料、钻井资料、速度数据、叠加和偏移成像相互结合、互相印证来对多次波进行识别和压制。基于多次波压制方法的特点结合实际情况,在叠前使用Radon滤波方法,叠后使用预测方法对多次波进行分步压制,可以取得较为满意的成像效果。

参考文献:

- [1] 石瑛,王赟,芦俊.煤田地震多属性分析技术的应用[J].煤炭学报,2008,33(12):1397-1402.
Shi Ying,Wang Yun,Lu Jun.Discussion on seismic recognition of deformed coal [J].Journal of China Coal Society,2008,33(12):1397-1402.
- [2] 杨春,王赟,杨德义.构造煤的地震可识别性特征[J].煤炭学报,2014,39(S2):465-470.
Yang Chun,Wang Yun,Yang Deyi.Discussion on seismic recognition of deformed coal [J].Journal of China Coal Society,2014,39(S2):465-470.
- [3] 杨臣明.全数字高密度煤矿采区三维地震技术研究与实践[J].中国煤田地质,2014,26(3):46-52.
Yang Chenming.All digital high density coalmine winning district 3D seismic prospecting technology research and practices [J].Coal Geology of China 2014,26(3):46-52.
- [4] 闫涛滔,刘大猛,姚艳斌等.地震技术在长治经纺矿区煤储层研究中的应用[J].煤炭科学技术,2012,40(2):102-106.
Yan Taotao,Liu Dameng,Yao Yanbin *et al*.Application of seismic technology to study on coal reservoir in Changzhi Jingfang Mining Area [J].Coal Science and Technology 2012,40(2):102-106.
- [5] 吕进英,郭磊.地震勘探中多次波的识别和压制[J].中州煤炭,2011(4):29-31.
Lyu Jinying,Guo Lei.Identification and suppression of multiple Waves in seismic exploration [J].Zhongzhou Coal 2011(4):29-31.
- [6] 石颖,王维红.表面多次波压制方法[M].北京:地质出版社,2012.
- [7] 陈浩林,张保庆,刘军等.地震多次波去除技术的过去现在和未来[M].北京:石油工业出版社,2010.
- [8] 王维红,崔宝文,刘洪.表面多次波衰减的研究现状与进展[J].石油地球物理勘探,2007,22(1):156-164.
Wang Weihong,Cui Baowen,Liu Hong.Research progress in surface-related multiple attenuation [J].Oil Geophysical Prospecting 2007,22(1):156-164.
- [9] 李鹏,刘伊克,常旭等.多次波问题的研究进展[J].地球物理学进展,2006,21(3):888-897.
Li Peng,Liu Yike,Chang Xu *et al*.Research progress in surface-related multiple attenuation [J].Progress in Geophysics,2006,21(3):888-897.
- [10] 石颖,邢小林.表面多次波压制的研究进展:回顾与展望[J].地球物理学进展,2011,26(6):2046-2054.
Shi Ying,Xing Xiaolin.Investigation progress on surface-related multiple suppression: review and outlook [J].Progress in Geophysics 2011,26(6):2046-2054.
- [11] 王学军,李虹,郭惠英等.阿曼Amel区块地震数据中复杂多次波的分析与压制[J].石油地球物理勘探,2012,47(6):894-900.
Wang Xuejun,Li Hong,Guo Huiying *et al*.Analysis and suppression of complex multiples forland seismic data in Block Amel,Oman [J].Oil Geophysical Prospecting 2012,47(6):894-900.
- [12] 李振华,李镇春,王鹏等.多次衰减的λ-f域高分辨率Radon变换[J].应用地球物理,2013,10(4):433-441.
Li Zhenhua,Li Zhenchun,Wang Peng *et al*.Multiple attenuation using $\lambda-f$ domain high-resolution Radon transform [J].Applied Geophysics 2013,10(4):433-441.
- [13] 王保丽,Sacchi M D,印兴耀等.基于保幅拉东变换的多次波衰减[J].地球物理学报,2014,57(6):1924-1933.
Wang Baoli,Sacchi M D,Yin Xingyao *et al*.Multiple attenuation based on amplitude preserving Radon transform [J].Chinese Journal of Geophysics 2014,57(6):1924-1933.
- [14] 石颖,王维红,李莹等.基于波动方程三维表面多次波预测方法研究[J].地球物理学报,2013,56(6):2023-2032.
Shi Ying,Wang Weihong,Li Ying *et al*.3D surface-related multiple prediction approach investigation based on wave equation [J].Chinese Journal of Geophysics 2013,56(6):2023-2032.
- [15] 石颖,王维红.基于波动方程预测和双曲Radon变换联合压制表面多次波[J].地球物理学进展,2012,55(9):3115-3125.
Shi Ying,Wang Weihong.Surface-related multiple suppression approach by combining wave equation prediction and hyperbolic Radontransform [J].Chinese Journal of Geophysics,2012,55(9):3115-3125.
- [16] 李振春,李志娜,郭书娟等.数据域与成像域多次波压制方法对比[J].地球物理学进展,2013,28(6):2901-2910.
Li Zhenchun,Li Zhina,Guo Shujuan *et al*.Comparison of multiple attenuation methods in data domain and image domain [J].Progress in Geophysics 2013,28(6):2901-2910.
- [17] 叶月明,赵昌垒,庄锡进等.基于地震干涉法的叠后层间多次波衰减方法[J].石油地球物理勘探,2014,49(6):1077-1082.
Ye Yueming,Zhao Changlei,Zhang Xijin *et al*.Post stack interbed multiple suppression based on seismic interferometry [J].Oil Geophysical Prospecting 2014,49(6):1077-1082.