

## · 煤田物探 ·

# 滤波处理提高道积分法反演煤层厚度的精度\*

刘建华 刘天放 (中国矿业大学资环学院 徐州 221008)

**摘要** 道积分法反演煤层厚度,其计算的煤层厚度往往受到地震子波的类型和主频的影响。根据煤厚的分布范围,选择合适的滤波频带,对道积分剖面进行滤波处理可以提高煤厚的反演精度。

**关键词** 道积分法 煤厚反演 频率滤波 反演精度

**中国图书资料分类法分类号** P631.443

**作者简介** 刘建华 男 32岁 讲师 地球物理勘探

## 1 引言

道积分技术是一种用于岩性解释的相对波阻抗技术,是通过对地震道的积分,而得到相对波阻抗剖面,剖面上各道信息实际上反映了近似等于标定的对数波阻抗滤波后的波阻抗信息,因此它非常有利于地层岩性的解释。

从薄层理论得知,薄层反射波波形具有入射地震子波的微分形式,而在道积分剖面上薄层反射波则表现为地震子波本身。在一定条件下,薄层厚度与道积分峰值振幅满足线性关系。在给定门槛限定后,根据钻孔已知煤厚资料对其比例系数标定后,就可以利用地震时间剖面反演计算煤层厚度。

## 2 道积分反演煤厚的基本原理

众所周知,应用线性模型,理论地震记录可以用下列数学模型表示:

$$S_i = r_i * W_i, \quad (1)$$

式中  $S_i$  —— 地震道记录;

$r_i$  —— 垂直入射的反射系数序列;

$W_i$  —— 地震子波。

对于一个薄层,反射系数表现为两个相邻的等值反号脉冲,如果地震波通过此地层,那么其输出近

似等于地震子波的导数(Widess, 1973)。因为<sup>[1]</sup>:

$$W(t) * [\delta(t) - \delta(t - \Delta)] = W(t) - W(t - \Delta), \quad (2)$$

$$\text{故 } \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{W(t) - W(t - \Delta)}{\Delta} = \frac{dW(t)}{dt}。 \quad (3)$$

式中  $W(t)$  —— 地震子波;

$\delta(t)$  —— 单位脉冲。

而在地震道积分剖面上,一个薄层的响应又近似等于地震子波<sup>[2]</sup>:

$$\int_0 S(t) dt = \int_0 \frac{dW(t)}{dt} dt = W(t) - W(t_0)。 \quad (4)$$

如不考虑  $W(t_0)$  的影响,则可简写为:

$$\int_0 S(t) dt = \int_0 \frac{dW(t)}{dt} dt = W(t)。 \quad (5)$$

在道积分剖面上,道积分峰值振幅与薄层时间厚度  $\Delta t$  之间的关系为<sup>[3]</sup>:

$$A = R_1 A_m / (T/4) \cdot \Delta t + A_m (R_2 - R_1) \quad (6)$$

式中  $R_1$  —— 煤层顶板反射系数;

$R_2$  —— 煤层底板反射系数;

$A_m$  —— 道积分最大峰值振幅;

$T$  —— 地震子波周期。

令

$$k = R_1 A_m / (T/4) ,$$

$$c = (R_2 - R_1) A_m ,$$

若  $k, c$  均为常数,则有

$$A = k \Delta t + c.$$

也即薄层厚度与薄层道积分峰值振幅满足线性关系。当薄层时间厚度  $\Delta t = T/4$  时,  $A = R_1 A_m + c$ , 此

\* 煤炭部“八五”攻关项目“煤田物探岩性勘探方法研究”中子课题的部分成果。

时,  $h = \lambda/8$ , 而当  $\Delta t > T/4$ , 即  $h > \lambda/8$  时, 上式不适用。

(6) 式即为薄层厚度定量解释方法的依据。

### 3 道积分剖面的滤波处理

由(6)式的应用条件可知, 用道积分峰值振幅来反演薄层厚度, 必须在  $(0, \lambda/8]$  范围内, 即薄层厚度小于调谐厚度的一半, 而一旦超出这一范围, 则其计算误差较大。再由薄层理论可知, 地层的调谐厚度与地层的层速度和子波主频有关。因此, 当地层的厚度给定时, 根据解释的需要, 改变主频的大小, 可以使它属于薄层也可以使其属于厚层。

另从薄层理论可知, 对于一定主频的子波来说, 由调谐厚度划分厚层和薄层都有一定的厚度过渡区。在这个厚度过渡区范围内, 厚层视厚度与真厚度相偏离, 薄层振幅曲线与地层厚度不再是线性关系。因此, 利用过渡区的地震数据计算出的厚度误差较大。为了提高解释精度, 在地震资料处理时, 可针对目的层的厚度, 采用高通滤波, 使顶、底两个反射清楚地分离开, 这样目的层的厚度就能避开厚层过渡区, 而进入理想的时间分辨区(图1)。当然也可采用低通滤波, 使该目的层厚度跨越薄层过渡区而进入理想的薄层区<sup>[4]</sup>。

上述论点可进一步引用 Rayleigh 关于正弦波对一薄层的振幅响应来说明。Rayleigh 公式经 Koe-fod 修正为<sup>[5]</sup>:

$$\Phi = (\alpha - \alpha' [4 \cot^2(2\pi f/\lambda) + (\alpha'^2 + \alpha')^{-1/2}]^{1/2}) \cdot A_i / A_r. \quad (7)$$

式中  $\Phi = A_r / A_i$ , 为薄层复合反射波的振幅与入射

波振幅比, 称为薄层响应;

$\alpha$ —声阻抗比;

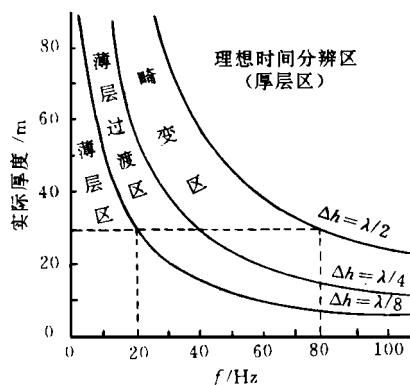


图 1 地层厚度与子波主频关系图

$d$ —薄层厚度;

$\lambda$ —薄层的波长。

图 2 是利用(7)式给出不同声阻抗值计算的薄层响应, 为  $d/\lambda$  和反射系数  $k$  的函数。从图 2 可以看出, 薄层厚度和薄层响应之间的线性关系位于比调谐厚度  $d/\lambda = 0.25$  低得多的区间。图中虚线是由(7)式计算的薄层响应值与它的线性近似值相差 10% 的值, 称为线性极限。 $d/\lambda$  在线性极限以内( $d/\lambda \ll 0.25$ )可以由(7)式通过简单的运算得到证明。薄层复合反射波的振幅为:

$$A_r = 4\pi k(d/\lambda). \quad (8)$$

可见, 对于给定的薄层来说,  $k$  和  $A_i$  为常量时, 则薄层复合反射波的振幅  $A_r$  与  $d/\lambda$  为线性关系, 超过线性极限, 误差大于 10%。所以, 当厚度一定时, 把波长看作变量, 即

$$d/\lambda = (d/v) \cdot f, \quad (9)$$

式中  $v$ —地震波速度。

则  $d/\lambda$  与子波主频  $f$  是呈比例变化的。通过提高或降低主频  $f$  的滤波, 使  $d/\lambda$  位于理想厚层区或线性极限的理想薄层区, 可以提高解释精度。由(9)式可以看出, 厚度越大,  $d/\lambda$  随  $f$  的增长越大, 越容易超过线性极限。图 2 也表现出这种特点。

由前面分析可知, 可以通过降低子波主频的滤波, 使  $d/\lambda$  位于线性极限的理想薄层区, 即改变薄层的调谐厚度, 而提高薄层的解释精度。因此可对地震剖面滤波处理, 由于地震道积分是线性系统, 我们既可以在积分前对地震道滤波, 也可以在积分之后对积分道滤波。而道积分的时窗较小, 滤波工作量也相对较小, 故采用对道积分滤波。

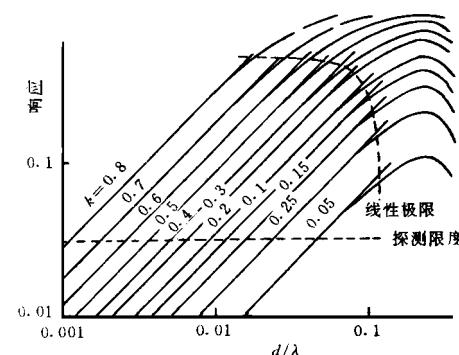


图 2 正弦波的反射响应为  $d/\lambda$  和  $k$  的函数

## 4 正演模型研究

### 4.1 道积分割面及相应的煤厚解释

在研究滤波对道积分法定量预测煤厚精度的影响时, 我们利用了对煤层逐渐变薄的正演理论模型(图 3), 数学上采用褶积模型来计算煤层反射波, 即

$$S(t) = R(t) * W(t), \quad (10)$$

式中  $S(t)$  —— 煤层复合反射波;

$R(t)$  —— 反射系数序列;

$W(t)$  —— 地震子波。

煤层反射系数序列为:

$$R(t) = R_1 \delta(t - t_1) + R_2 \delta(t - t_2), \quad (11)$$

式中  $t_1$  —— 煤层顶板双程垂直旅行时;

$t_2$  —— 煤层底板双程垂直旅行时。

而地震子波取零相位 Ricker 子波, 其表达式为<sup>[6]</sup>:

$$W(t) = [1 - 2(\pi f)^2] \cdot \exp[-(\pi f)^2], \quad (12)$$

式中  $f$  —— 地震子波主频。

为了分析子波主频与反演计算精度的关系, 在这里分别取子波主频  $f = 30 \text{ Hz}$ 、 $60 \text{ Hz}$  和  $90 \text{ Hz}$ , 其合成地震记录见图 4。图 5 是图 4 的道积分割面。

图 6 是利用道积分定量预测煤厚法计算的不同子波主频的道积分割面上的煤层厚度结果。可见, 道积分法反演的煤厚与子波主频有关, 子波主频越高, 计算出的煤厚误差越大, 故应设法降低主频, 拓宽低频频带, 以利提高计算精度。

### 4.2 滤波后的道积分割面及煤厚解释

从前述分析可知, 薄层响应的线性极限和调谐厚度都与子波的主频成反比, 可以通过低通滤波来降低地震波的主频, 使煤层都位于线性极限内, 从而提高煤厚定量解释精度。由图 5 的道积分割面低通滤波图(图 7)可见, 煤层的厚度都基本落入了薄层区内。

同样, 利用道积分峰值振幅对不同子波主频的

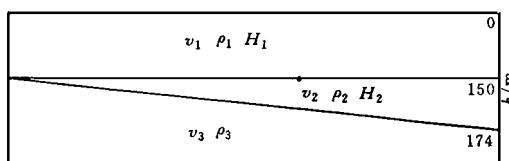


图 3 正演模型

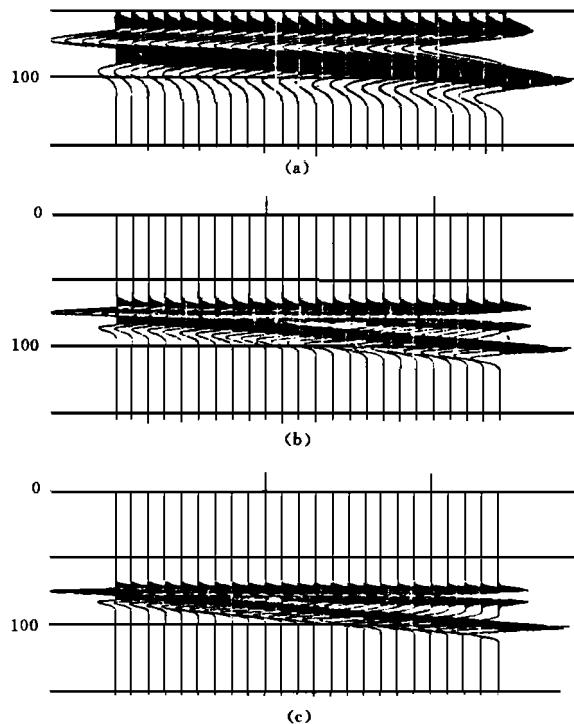


图 4 正演合成地震记录

(a) ——  $f = 30 \text{ Hz}$ ; (b) ——  $f = 60 \text{ Hz}$ ; (c) ——  $f = 90 \text{ Hz}$ ;

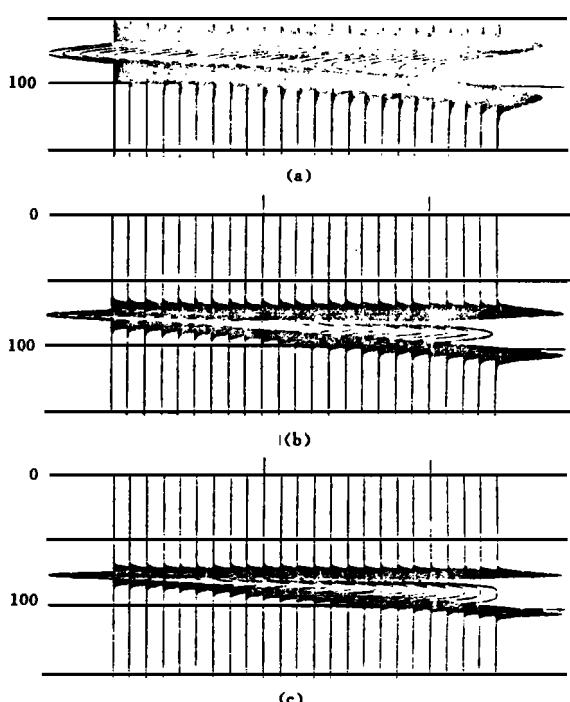


图 5 道积分割面

(a) ——  $f = 30 \text{ Hz}$ ; (b) ——  $f = 60 \text{ Hz}$ ; (c) ——  $f = 90 \text{ Hz}$ ;

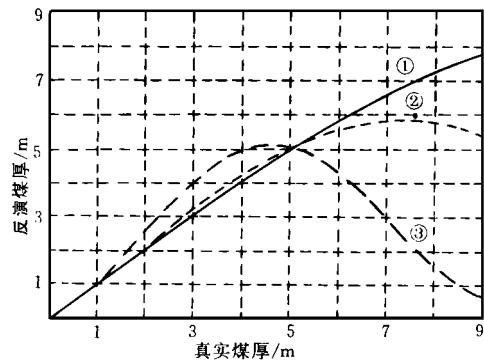


图 6 不同子波主频的反演计算结果

①—— $f = 30 \text{ Hz}$ ; ②—— $f = 60 \text{ Hz}$ ; ③—— $f = 90 \text{ Hz}$ ;

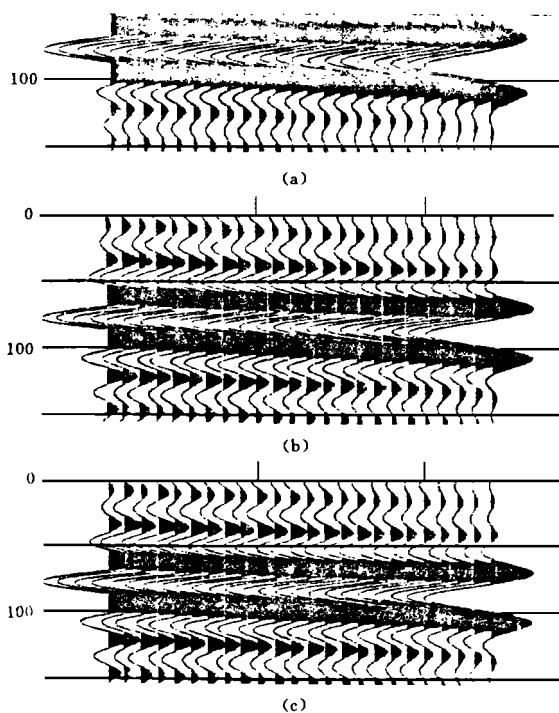


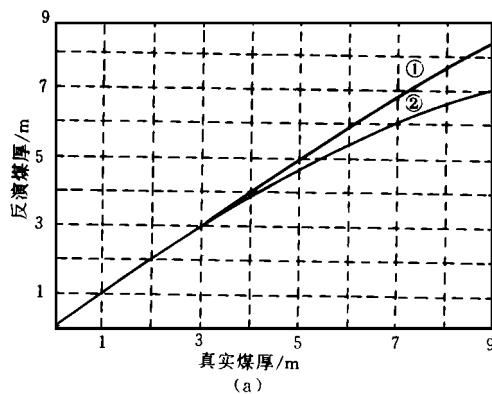
图 7 滤波后的道积剖面

(a) —— $f = 30 \text{ Hz}$ ; (b) —— $f = 60 \text{ Hz}$ ; (c) —— $f = 90 \text{ Hz}$ ;

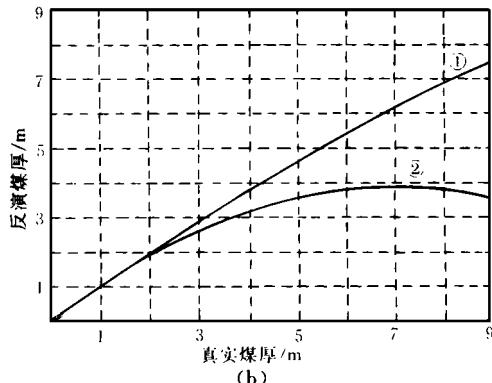
道积剖面在滤波前后的定量解释结果(图 8)对比分析可以看出, 通过低频带通滤波, 减少了反演计算误差, 提高了定量解释精度, 而且地震波主频越高, 提高精度的效果越明显。

## 5 结束语

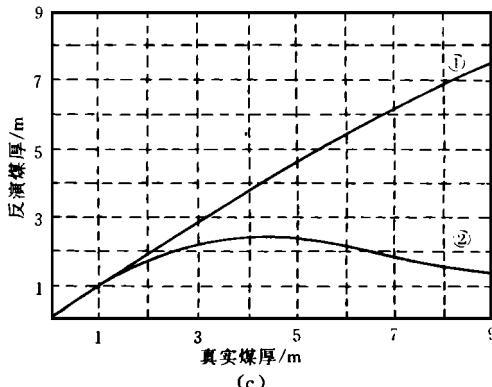
道积分法反演煤厚的精度与地震波的主频有关, 主频越高, 计算出的煤厚误差越大, 精度越低。因此, 在利用道积分技术来定量预测煤层厚度时, 应根



(a)



(b)



(c)

图 8 滤波前、后道积分反演结果对比图

(a) —— $f = 30 \text{ Hz}$ ; (b) —— $f = 60 \text{ Hz}$ ; (c) —— $f = 90 \text{ Hz}$ ;  
①——滤波后; ②——滤波前

据煤层厚度分布范围选择合适的滤波频带对道积分做低通滤波, 使煤层厚度基本落入线性极限范围内, 能够减少计算煤厚的误差, 从而提高预测煤厚的精度。

## 参考文献

- 1 Widess M B. Quantifying resolving power of seismic systems. Geophysics, 1982; 47(8)
- 2 姚建阳. 用地震道积分法提高地层的识别能力. 石油物探, 1990; 29(1)

# 岩石受力状态对弹性波传播速度的影响初探

刘盛东 (淮南矿业学院 232001)

杨玉岷 胡绍龙 (淮南煤电总公司新集煤矿 232006)

**摘要** 岩石所受的三向应力状态对其弹性波传播性质有一定的影响,此认识为所做的以泥质砂岩、泥岩和硅质胶结的坚硬砂岩为试样的实验所证实。实验结果表明,泥质砂岩和泥岩的  $v_p/v_s$  值几乎保持不变,硬质砂岩的  $v_p/v_s$  曲线却在应力达破坏荷载的 90% 左右出现下凹现象。经热处理后的硬质砂岩这一下凹现象则更突出。

**关键词** 岩石 应力状态 弹性波 影响

**中国图书资料分类法分类号** O343.9 O382.2

**作者简介** 刘盛东 男 34岁 讲师 工程物探

## 1 引言

用弹性波在岩体中的传播速度来评价岩体的工程性质在目前已被广泛采用。其依据是,对于绝大多数岩体,在一定强度范围内,岩体的弹性波速与岩体的强度和变形模量(特别是弹性模量)之间具有很高的相关性。通过实验建立起组成岩体的岩石力学性质与波速之间的相关关系后,就可以采用测定波速的方法去推测岩体的力学性质参数。目前,国内外对岩石的密度、孔隙度、含水量、抗压强度及变形模量

等因素对弹性波传播速度的影响都做了大量的研究,并建立了许多经验公式。但对岩石的受力状态是否影响其波速则缺少研究。由于我国大部分煤矿的开采深度已达数百米,采掘工程所涉及的岩体常处于高围压受力状态,因此,了解岩石的受力状态对弹性波传播速度的影响,对依据波速来判定岩体力学性质的技术具有重要意义。

大量的研究成果已证明,除了矿物成分外,岩石的孔隙和微裂隙是决定岩石力学性质及弹性波速的主要因素<sup>[1]、[2]</sup>。岩石的孔隙和微裂隙特征是随岩石

3 张立昌等·道积分剖面薄互层特征解释·石油地球物理勘探,1993;28(3)

4 苏盛甫·薄储集层的反射特征和定量解释方法·石油地球物理勘探,1988;23(4)

5 De Voogd N·Thin-layer response and spectral bandwid-

ty·Geophysics, 1983;48(1)

6 陈洁·道积分技术在油气检测中的应用·石油地球物理勘探,1993;28(2)

(收稿日期 1995-11-30)

## FILTERING IMPROVING THE ACCURACY OF PREDICTED COAL SEAM THICKNESS

Liu Jianhua Liu Tianfang

(China University of Mining and Technology)

**Abstract** It is possible to predict coal seam thickness with trace integration method, but the type and dominant frequency of wavelet have an effect on the calculated coal seam thickness. The accuracy of predicted coal seam thickness can be improved by choosing the proper filtering bandwidth in accordance with the distribution range of coal seam thickness and filtering the trace integration sections.

**Keywords** trace integration method; thickness inversion; frequency filtering; inversion accuracy