



# 地震反射波检测煤层厚度的直接反演方法

戚敬华 (煤炭科学研究院西安分院 710054)

**摘要** 为适应矿井建设时采区地震勘探检测煤层厚度的需要,从煤层具有地震勘探中“薄层”特点出发,建立煤层反射波数学表达式在频率域直接反演,并采用可减少非煤厚因素影响的谱平方比法检测煤厚,取得良好效果,可达到煤矿建设要求。

**关键词** 地震勘探 振幅谱 反演 煤层厚度

**中国图书资料分类法分类号** P631.44

**作者简介** 戚敬华 男 56岁 研究员 地球物理勘探

## 1 前言

综采煤矿对地震勘探提出了更高的要求,它不仅要求查明落差小于10 m(甚至5 m)的断层和煤层起伏形态,而且要求进行煤厚检测。以往煤层厚度是通过钻孔对比内插获取的。对于单个钻孔,煤厚数据是准确的,但对孔间的煤厚,因孔距在数百m以上,其内插结果准确度欠佳。地震反射法采区勘探测点稠密,一般5 m一个测点,近似连续观测,若把地震波信息充分利用起来,在探查小构造的同时检测

煤厚,不仅可提高探测精度,而且可大大减少钻孔数量,工期短,投资少,效益高,意义大。

人们在对煤层和煤层反射波的研究中发现,多数煤层厚度不大于10 m,煤层反射波主波长一般在40 m左右,而在地震勘探中一般把层厚小于 $1/4$  波长的地层定义为“薄层”,因此煤层属于薄层。

Rayleigh(1945)和Ricker(1953)从分辨率角度提出了当层厚 $h$  小于 $1/4$  波长 $\lambda$  时,该层已不能用反射波时差来分辨,即该层不能被检测。Widess(1973、1982)研究得出,在 $h < \lambda/8$  时,薄层反射波振

的L/min显示。

## 5 应用效果

防爆型矿井明渠流量仪于1991年研制成功以来,在几个矿区和自来水厂试用,现场运行各项指标均达到设计要求。投入批量生产后,已广泛应用于焦作、石嘴山、江西丰城、山西晋城、山东临沂、湖南涟邵等矿务局。仪器运行性能可靠,效果良好。

防爆型矿井明渠流量仪是便携式、智能化数字测量仪表,仪器精度高、操作简便、防爆、节电。除了适用于矿井下各种排水沟的流量测量外,也可以广泛应用于工业、农业、水利、环保等部门的各种排水明渠及上、下水管的流量测量。

(收稿日期 1995-07-27)

### 4.3.3 测流速

由于受渠壁的影响,渠道中水流速度极不均匀,但却有一定规律的流速分布。因此在选定测点后,可在此点垂线上作不同水深的≤6次的测量,以求得平均值。另外,程序设计中还允许选定测量时间1 s~15 s,以使测量误差尽可能减小。

### 4.3.4 选测点

根据渠道断面流速分布图可在明渠截面上进行多个测点测量,也可以沿渠道另选合适的测点测量,以求高精度。数据存贮器的贮存量允许仪器可连续测量≤20点。

### 4.4 计算

为了求得精确的测量数值,软件对数值的精度作了处理。最后按流速面积法求得流量,并化为通用

幅与薄层厚度成正比,首次突破了纯几何方法用时差求反射层厚度的局限,由动力学特征给出了薄层定量化的具体定义。Koefoed 和 Voogd(1980)研究得出薄层厚度和其反射波振幅之间存在着准线性关系。Voogd 和 Rooijen(1983)研究指出频带宽度影响着薄层界面的分辨。上述学者对薄层研究在理论上都作出了一定贡献,并指出可用反射波振幅等参数估算薄层厚度。实际工作中,由于反射波振幅易受资料采集和资料处理过程中非煤厚因素影响,计算结果起伏很大。

笔者利用推导出的煤层反射波数学表达式直接反演,并采用可减少或部分消除资料采集和处理过程中非煤厚因素影响的算法,取得了良好的效果。

## 2 煤层反射波数学表达式

在煤田地震勘探中,煤层与其顶底岩层存在着大的物性差异,具有大的波阻抗差,在地震记录上形成相当强的反射波,这个与煤层有关的反射波,称为煤层反射波。

煤层属于薄层,煤层反射波既不是单个煤层顶界面的反射波,也不是其底界面的反射波,而是与其顶底界面都有关的各种反射波的复合波,即顶底界面反射波,层间多次波和各种转换波叠加的结果。在垂直入射情况下,没有转换波,煤层反射波主要是顶底界面反射波和煤层内多次波叠加的复合波。

设有一煤层厚度为  $h$ ,密度为  $\rho_2$ ,波速为  $v_2$ ,其上下围岩(砂岩或页岩、泥岩)密度和速度分别为  $\rho_1$ 、 $\rho_3$  和  $v_1$ 、 $v_3$ ,则煤层上界面( $R_1$ )的反射系数

$$k_1 = (v_2\rho_2 - v_1\rho_1) / (v_2\rho_2 + v_1\rho_1),$$

煤层下界面( $R_2$ )的反射系数

$$k_2 = (v_3\rho_3 - v_2\rho_2) / (v_3\rho_3 + v_2\rho_2).$$

当有一子波  $P_1$  入射到界面  $R_1$  时,在界面  $R_1$  上产生反射波  $P_{11}$  和透射波  $P_{12}$ ;  $P_{12}$  在界面  $R_2$  上又产生反射波  $P_{122}$  和透射波  $P_{123}$ ;  $P_{122}$  在界面  $R_1$  上又会产生反射波  $P_{1221}$  和透射波  $P_{1222}$ ;……。

设入射子波形式为

$$u_{P_1} = B_{P_1} e^{j\omega(t-z/v_1)},$$

式中  $u_{P_1}$ ——入射子波沿  $z$  轴引起的质点位移;

$B_{P_1}$ ——入射子波振幅;

$\omega$ ——圆频率;

$t$ ——旅行时;

则  $P_{11}$ 、 $P_{12}$ 、 $P_{122}$ 、 $P_{1221}$  可分别表示为:

$$u_{P_{11}} = A_{P_{11}} e^{j\omega(t+z/v_1)},$$

$$u_{P_{12}} = A_{P_{12}} e^{j\omega(t+z/v_2)},$$

$$u_{P_{122}} = A_{P_{122}} e^{j\omega[(t+z/v_1)+\varphi]},$$

$$u_{P_{1221}} = A_{P_{1221}} e^{j\omega[(t+z/v_1)-zh/v_2]},$$

式中  $\varphi = -2\omega h/v_2$ , 为反射波  $P_{122}$  的初相位。

在垂直入射情况下,  $P_{11}$ 、 $P_{1221}$ 、 $P_{12221}$  …… 等波发生叠加,于是,煤层反射波可表示为

$$u_p + u_{P_{11}} + u_{P_{1221}} + u_{P_{12221}} + \dots$$

经整理后得:

$$u_p = B_{P_1} k_1 e^{j\omega(t+z/v_1)} \cdot [1 + \delta e^{j\omega\tau} / (1 - q e^{j\omega\tau})],$$

式中  $\delta = (1 - k_1)(1 + k_1)k_2/k_1$ ;

$$q = -k_1 k_2;$$

$$\tau = zh/v_2.$$

变换到频率域则煤层反射波振幅谱表达式为:

$$A(f) = B(f) \cdot k [1 - 2(q - \delta) \cos \omega \tau + (q - \delta)^2 / (1 - 2q \cos \omega \tau + q^2)]^{1/2}$$

式中  $A(f)$  和  $B(f)$  分别为煤层反射波和入射子波在频率域的振幅。

由于  $q$  很小,可以忽略,于是上式可简化为:

$$A(f) = B(f) \sqrt{k_1^2 (1 + 2\delta \cos \omega \tau + \delta^2)}.$$

因为  $\delta = (1 - k_1)(1 + k_1)k_2/k_1$ ,

所以

$$A(f) = B(f) [(k_1^2 - k_1^2 k_2^2 + k_2^2) + 2(1 - k_1^2) k_1 k_2 \cos \omega \tau]^{1/2}. \quad (1)$$

(1) 式表明煤层反射波不仅与煤层顶底界面反射系数和入射子波有关,而且与波在煤层中的双程旅行时,即与煤层厚度有关。如设法反演该式即可获得煤厚信息,因而该式是煤厚直接反演的基本理论公式。

## 3 反演计算方法

设已知厚度和未知厚度的煤层反射波振幅谱分别为  $A_0(f)$  和  $A(f)$ ,由(1)式可得:

$$A_0(f) = B(f) [(k_1^2 - k_1^2 k_2^2 + k_2^2) + 2(1 - k_1^2) k_1 k_2 \cos \omega \tau_0]^{1/2}. \quad (2)$$

$$A(f) = B(f) [(k_1^2 - k_1^2 k_2^2 + k_2^2) + 2(1 - k_1^2) k_1 k_2 \cos \omega \tau]^{1/2}. \quad (3)$$

令  $C(f) = |A(f)|^2 / |A_0(f)|^2$ ,

则由(2)和(3)式可得

$$C(f) = (1 + P \cos \omega t) / (1 + \cos \omega t_0)。 \quad (4)$$

由(4)又可得:

$$P = [1 - C(f)] / [C(f) \cos \omega t - \cos \omega t_0]。 \quad (5)$$

这样,在子波横向稳定的情况下,利用两个过井地震道(煤层已知)振幅谱平方比可计算出  $C(f)$  和  $P$  值,然后对(4)式进行反余弦计算(取第一周期),即可求得每一地震道煤层反射波对应的煤层厚度:

$$h = \arccos \{ [C(f)(1 + \cos \omega t_0) - 1] / P \} \cdot v / 2\omega。 \quad (6)$$

要求(6)式在第一周期内的解,需使  $0 \leq \omega t_0 < \pi$ ,即需使  $h < \lambda / 4$ 。

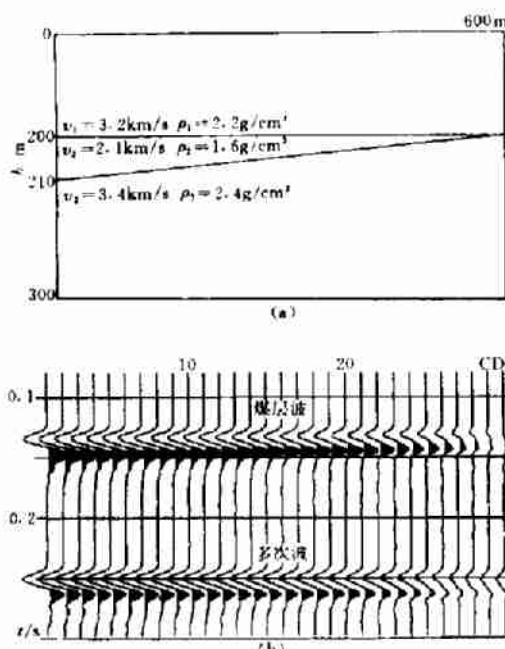


图 1 正演模型

a—地质模型;b—有限差分波动方程合成地震记录

#### 4 反演计算的可行性

如图 1 所示,用有限差分数学模型程序产生一楔形煤层的正演合成地震记录,煤层厚度 0~10 m。对合成地震记录的反演计算结果如表 1 所示。其反演结果与模型给出的煤厚数据相比,最大绝对误差小于 0.4 m,证实所建立的反演计算方法可以用于地震资料的煤厚反演。

#### 5 实测资料反演

用于反演的地震资料是安徽潘集、山东梁宝寺、陕西大保当 3 个地区的 6 条测线,其中潘集 G<sub>2</sub> 线和梁宝寺 L<sub>x</sub> 线地震剖面分别如图 2 和图 3 所示。反演煤层分别是潘集的 13—1 煤、梁宝寺的 3 煤、大保

表 1 图 1 模型的煤厚反演结果

道号	模型厚度/m	计算厚度/m	绝对误差/m	相对误差/%
1	10	10.0393	0.039	0.04
4	9	9.2391	0.239	2.7
7	8	8.2491	0.249	3.1
10	7	7.3699	0.370	5.3
13	6	6.4095	0.410	6.8
15	5	5.3667	0.367	7.3
19	4	4.2068	0.209	5.2
22	3	3.3968	0.397	13.2
25	2	2.3675	0.368	18.4

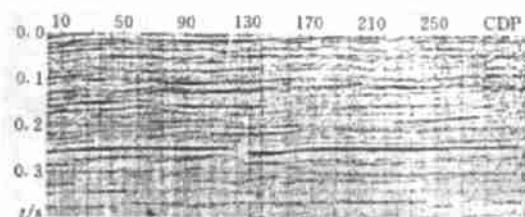


图 2 潘集 G<sub>2</sub> 线地震剖面

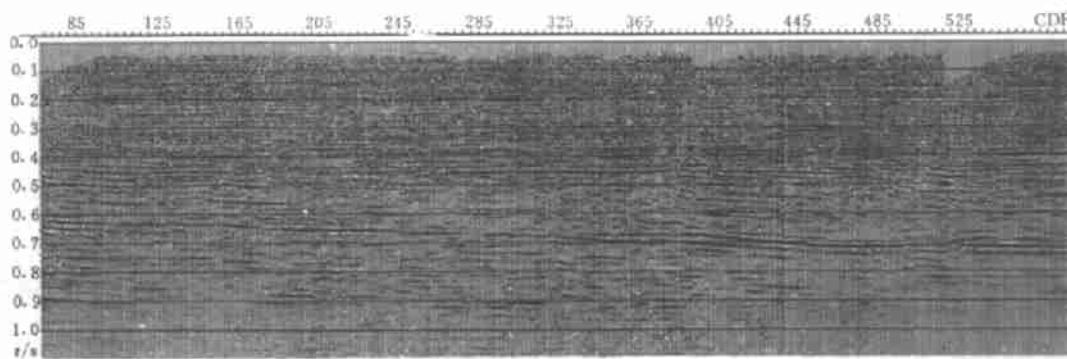


图 3 梁宝寺 L<sub>x</sub> 线地震剖面

当的2煤。在反演前,首先要在地震剖面上识别对比出目的煤层反射波,然后确定包含该煤层反射波的时窗。由于煤层与围岩波阻抗差大,其反射波常以波形突出、振幅强的标志出现在地震记录上,易于识别和对比。当煤层起伏或倾斜时,在横向应采取自动跟踪的办法选择时窗,以使煤层反射波保持在所取时窗的中间。

由图可见,图2所示的煤层反射波位于250~300 ms,图3所示的煤层反射波位于600~700 ms,目的层反射波能量强、波形突出、连续性较好、信噪比较高,适合于作反演计算用。

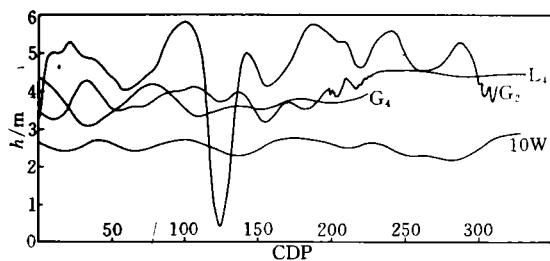


图4 潘集G<sub>2</sub>、G<sub>4</sub>、L<sub>4</sub>、10W线煤厚反演结果

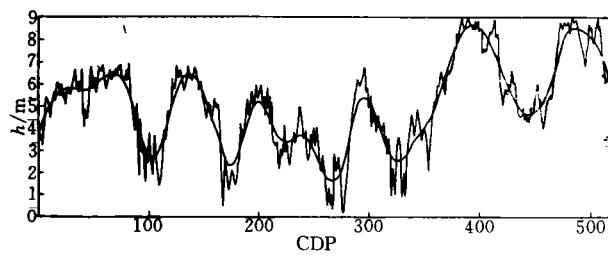


图5 梁宝寺L<sub>8</sub>线煤厚反演结果

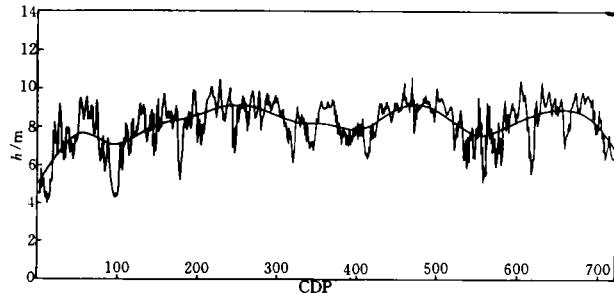


图6 大保当L<sub>54</sub>线煤厚反演结果

表2 反演计算厚度与钻探揭露厚度对比表

测线号	CDP/桩号	已知厚度	计算厚度	绝对误差	相对误差
		/m	/m	/m	/%
L8	8/4945	5.02	5.380	0.360	6.69
L8	255/6180	2.67	2.863	0.193	6.74
L8	481/7310	9.24	8.960	-0.280	3.12
G2	113/1173	5.91	6.062	0.152	2.50
G4	45/1045	3.40	3.533	0.133	3.76
G4	73/1073	3.75	4.313	0.563	13.05
L4B	31/1371	4.18	4.800	0.620	12.91
L4B	197/1533	3.64	3.840	0.200	5.20
L4B	203/1543	3.40	3.525	0.125	3.54
L4B	263/1603	4.10	4.540	0.440	9.69
10W	195/1344	2.49	2.858	0.368	12.87
10W	239/2388	2.40	2.641	0.241	9.12
L54	670/2338	9.09	8.902	0.188	2.10

6条测线的煤层反演结果如图4、图5和图6所示,计算的煤厚都在9 m以内,煤厚小于1/4波长,满足反演公式的适应条件。反演与钻孔揭露的煤厚数据对比列于表2。从表中数据可以看出,平均绝对误差小于0.36 m,最大绝对误差小于0.62 m,反演结果满足煤矿建井要求。

另外,从煤厚反演曲线(图4、图5)上还可以看出,当测线穿过断层时,由于断层附近干涉严重,反演结果的精度受到影响。另一方面,煤厚曲线的突然下降,也可以帮助识别断层和断层位置。如L<sub>8</sub>线有6条落差在10 m左右的小断层,分别位于CDP97、113、170、186、259和280号点(300~400,400~500号点之间的突变是由于地形影响,迭加次数减少造成的),G<sub>2</sub>线的123号点,在煤层曲线上均有突然下降显示,且对应很好,说明本煤厚反演方法具有自动识别小断层的功能。

#### 参考文献

- 戈革等. 地震波动力学基础. 北京:石油工业出版社,1983
- Widess M B. How thin is a thin bed?. Geophysics, 1973;38
- Voogd N, Rooijen H. Thin-layer Response and Spectral Bandwidth. Geophysics, 1983;48

(收稿日期 1995—07—20)

## THE DIRECT INVERSE METHOD OF COAL SEAM THICKNESS DETECTION BY SEISMIC REFLECTED WAVE

Qj Jinghua (Xi'an Branch CCMRI)

**Abstract** In order to adapt the need of mine construction for the coal seam thickness detection by seismic exploration in

# 时间剖面上小断层的计算机自动检测

杨文强 钱建伟 刘天放 董守华

(中国矿业大学 徐州 221008)

**摘要** 煤田地震勘探一直探寻着对小断层的自动检测方法,因受各种因素的影响,至今尚无良策。本文介绍了多元地震参数的模式识别方法,并通过模型及实测资料成功地检测到10 m以下小断层。

**关键词** 小断层 自动检测 模式识别 地震勘探

**中国图书资料分类法分类号** P631.44

**作者简介** 杨文强 男 28岁 助教 地球物理勘探

## 1 引言

分析和确定断层是煤田地震勘探的重要任务。目前人们对落差大于10~15 m的断层已能够很好地解释,而对落差在10~15 m以下的小断层的研究主要还是通过从时间剖面上肉眼观察地震波的振幅、相位和时差等来确定。由于时间剖面分辨率等因素的影响,效果一般不很理想。

近年来,数字地震仪的更新及计算机技术的迅速发展,给小断层的识别提供了有利条件,人们可以借助于计算机将蕴涵于地震资料中的信息尽可能多的提取出来,用于小断层的自动识别。本文从地震波的运动学和动力学特征出发,用地震参数的模式识别方法,通过模型及实例成功地检测到了10 m以下的小断层。

## 2 多元地震参数

地震波不仅包含着运动学特征,而且包含着大量的动力学信息。这两类信息主要反映在时间域和

频率域的地震参数之中。因此合理地选择地震参数,是从中提取各类信息的关键。

### 2.1 时间域参数

**2.1.1 反射波时间  $T$**  地震反射波相位的改变反映了反射波初至时间的变化。在断层两盘地层发生错动时,同一波阻抗界面空间位置发生变化,到达断层两盘的地震波初至相位产生一定的差异,使初至时间不同。而在大多数煤系中,煤层反射波是能量很强的标准反射波,因此提取和分析煤层反射波时间有利于对煤层中断层的识别。

煤层反射波时间  $T$  是指有效波所在的时窗内最大振幅所对应的时间。

**2.1.2 反射波振幅  $A_{\max}$**  时间域振幅反映了地震波能量的强弱,在有断层的地方,地震波振幅的衰减情况与断层带的宽度、断层落差及岩石的破碎程度等因素有关。

$A_{\max}$ 是指煤层反射波时间  $T$  所对应的振幅(图1)。

**2.1.3 相邻道最大互相关函数  $R_{xy}$**  在断层处,反

mining area, and proceed from the characteristic of coal seam as a "thin layer" in seismic exploration, the mathematical expression of coal seam reflected wave is established, and directly inverted in the frequency domain. The coal seam thickness is detected by the spectral square ratio method which can reduce the effects of non-thickness factors, the good effectiveness is obtained, and the requirement of mine construction can be achieved.

**Keywords** seismic exploration; amplitude spectrum; inverse; coal seam thickness