

# 含煤地层 AVO 正演模型参数优选分析

师素珍,韩毅,刘万金,邹冠贵,李巧灵

(中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083)

**摘要:**采用 GEOVIEW 软件,选取顶底板为泥岩,中间为煤层(厚度变化范围 0~30m)的三层介质作模型,通过改变中间煤层的厚度、处理采样率、子波等参数,并保持上下围岩参数不变的方式来讨论相关参数对 AVO 响应的影响,结果表明当处理采样率越高时,AVO 截距和梯度精度就越高;子波采样率过低,会引起 AVO 截距和梯度值的扰动现象;当子波采样率提高到一定程度时,扰动现象消除;子波主频的大小决定了调谐效应的范围,提高地震波主频,有利于提高分辨率;子波长度的变化对 AVO 截距和梯度值求取影响不大。上述结论为 AVO 正演模型参数优选提供了依据,其最佳参数的选取可有效提高含煤地层 AVO 正演模型的精度。

**关键词:**含煤地层;AVO 正演;煤层厚度;处理采样率;子波

**中图分类号:** P631.4

**文献标识码:** A

## Parameter Optimization of AVO Forward Model for Coal-bearing Strata

Shi Suzhen, Han Yi, Liu Wanjin, Zou Guangui and Li Qiaoling

(State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, CUMT, Beijing 100083)

**Abstract:** In order to get the accurate AVO forward model responses for coal-bearing strata, the AVO responses vary with the coal thickness, processing sample rate and wavelet parameters have been discussed on condition that the surrounding rock is unchangeable. The results show that the higher the processing sample rate, the better the accuracy of the intercept and gradient. Low wavelet sample rate will cause the fluctuation of intercept and gradient, but it can be eliminated when the wavelet sample rate has improved to a certain level. The dominant frequency decides the range of the tuning effect. To improve the dominant frequency will help to improve the resolution. The length of the wavelet has little effects to the intercept and gradient. The conclusions above could help to choose the appropriate parameters for the AVO forward modeling, thus to improve the accuracy of the AVO forward model for coal-bearing strata.

**Key words:** coal-bearing strata; AVO forward modeling; coal seam thickness; processing sample rate; wavelet

AVO 分析的提出,最初仅仅是为了提高碳氢检测能力,如今 AVO 的发展已经渗透到地震勘探的其他领域<sup>[1]</sup>,将 AVO 技术应用于煤层瓦斯富集区的探测就是极具代表性的一例。AVO 正演模型研究是应用 AVO 方法进行含气检测和反演的基础,因此利用 AVO 技术检测煤层的含气性首先要进行 AVO 正演模拟。利用正演模型来分析靶区主要目的层 AVO 曲线的类型,从而建立靶区地层组合和典型 AVO 特征图集,将有利于 AVO 资料的处理和解释工作。AVO 正演方法不仅提供了一些岩性的检测标志,更

重要的是提供了一种分析思想。

1997 年 Ramos 等在 Cedar Hill 煤层气田用 AVO 方法检测煤层裂隙,开创了 AVO 技术用于煤田地震勘探领域的先河<sup>[2]</sup>。之后,许多学者在这方面进行了研究,张爱敏等对不同厚度煤层 AVO 特征进行了研究<sup>[3]</sup>,绘出煤层厚度依赖于反射、透射系数的关系,为煤层厚度预测提供了新途径;彭苏萍等对煤层顶底界面振幅随偏移距变化特征及其影响因素进行了研究<sup>[4]</sup>,指出煤层顶界面更有利于 AVO 分析,煤层 AVO 响应受煤体破坏程度、顶板岩性和煤层厚度调谐作用的影响;董守华通过正演模型分析指出,对于煤层作 AVO 分析时入射角范围选择应在  $6^\circ \sim 28^\circ$ ,而且随着煤与其顶、底板速度差异减小,这个范围扩大<sup>[5]</sup>。专家学者的研究极大地促进了 AVO 技术在煤田领域的推广,为煤层厚度及煤层裂隙的预测提供了新思路。

本文侧重于讨论在上下围岩参数固定不变的条

**基金项目:**国家“973”项目(2006cb202209);国家自然科学基金重大项目(50490271);国家创新研究群体基金(50221402);教育部“长江学者和创新团队发展计划”(IRT0408);国家杰出青年基金项目(50025413)。

**作者简介:**师素珍(1983—),女,山西晋中人,在读博士,从事地震勘探方面的研究。

**收稿日期:**2009-03-13

**责任编辑:**孙常长

件下,通过改变中间煤层的厚度、处理采样率、子波等参数,来分析 AVO 响应的变化特征,为 AVO 正演模型参数优选提供依据,以提高含煤地层 AVO 正演模型的精度。

## 1 基本原理

平面纵波以非零入射角入射到固体弹性分界面时,会产生各种波的转换和能量的重新分配,Zoeppritz 方程能合理地描述各波参数之间的关系。它是根据平面入射纵波在岩层分界面的位移、应力的连续性导出的,它是一个四阶矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} \sin\theta_1 & \cos\Phi_1 & -\sin\theta_2 & \cos\Phi_2 \\ -\cos\theta_1 & \sin\Phi_1 & -\cos\theta_2 & -\sin\Phi_2 \\ \sin 2\theta_1 \frac{v_{p1}}{v_{s1}} \cos 2\Phi_1 & \frac{\rho_2 v_{s2} v_{p1}}{\rho_1 v_{s1}^2 v_{p2}} \sin 2\theta_2 & -\frac{\rho_2 v_{s2} v_{p1}}{\rho_1 v_{s1}^2} \cos 2\Phi_2 \\ \cos 2\Phi_1 - \frac{v_{s1}}{v_{p1}} \sin 2\Phi_1 & -\frac{\rho_2 v_{p2}}{\rho_1 v_{p1}} \cos 2\Phi_2 & -\frac{\rho_2 v_{s2}}{\rho_1 v_{p1}} \sin 2\Phi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{pp} \\ R_{ps} \\ T_{pp} \\ T_{ps} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 \\ -\cos\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \\ -\cos 2\Phi_1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $R_{pp}$  为纵波反射系数; $R_{ps}$  为横波反射系数; $T_{pp}$  为纵波透射系数; $T_{ps}$  为横波透射系数; $v_{p1}$ 、 $v_{s1}$ 、 $\rho_1$  为上层介质纵、横波速度及密度; $v_{p2}$ 、 $v_{s2}$ 、 $\rho_2$  为下层介质纵、横波速度及密度; $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为纵波入射角和透射角; $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$  分别为横波反射角和透射角;当纵波的入射角  $\theta_1$  和界面两侧的弹性参数已知时,可由斯奈尔定律求得  $\theta_2$ 、 $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$ ,由 Zoeppritz 方程可计算出界面的纵、横波反射系数和透射系数<sup>[6]</sup>。

由于其数学上的复杂性和物理上的非直观性,国内外很多学者从不同方面对 Zoeppritz 方程进行简化,提出了不同的纵波反射系数的近似表达式。Shuey (1985)<sup>[7]</sup>的公式是目前最为常用的简化公式,具体表达式为:

$$R_{pp} = R_0 + \left[ A_0 R_0 + \frac{\Delta\sigma}{(1-\sigma)^2} \right] \sin^2\theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta v_p}{v_p} (\tan^2\theta - \sin^2\theta), \quad (2)$$

式中,

$$R_0 = \frac{\Delta v_p / v_p + \Delta\rho/\rho}{2}, B = \frac{\Delta v_p / v_p}{\Delta v_p / v_p + \Delta\rho/\rho},$$

$$A_0 = B - 2(1+B) \frac{1-2\sigma}{1-\sigma}, \Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1, \sigma = \frac{\sigma_2 + \sigma_1}{2}。$$

在入射角比较小( $<30^\circ$ )时, $P$ 波反射振幅  $R(\theta)$  满足:

$$R(\theta) \approx I + G \sin^2\theta, \quad (3)$$

式中: $I$  是垂直入射时  $P$  波反射振幅, $G$  是  $P$  波反射振幅随(或者偏移距)变化的梯度,纵波反射系数近

似与入射角正弦值的平方成线性关系,上式是目前 AVO 处理的基础。

## 2 正演模型制作方法

本文采用加拿大 Hampson Russell 公司的 GEOVIEW 软件,选取顶底板为泥岩,中间为煤层的三层介质作为模型,煤层厚度变化为 0~30m。具体参数如下所示:

射线追踪方法作为一种快速有效的波场近似计算方法,是目前在生产实际中应用最广泛的正演模拟技术。射线追踪法属于几何地震学方法,主要考虑的是地震波传播的运动学特征,因此计算速度快<sup>[8]</sup>。具体步骤如下。

①根据设计的入射角步长(或炮检距步长)用精确的 Zoeppritz 方程计算模型中每一分界面的纵波反射系数。

②计算每一分界面反射系数曲线的以入射角或炮检距为参数的波旅行时,选用合适的子波与反射系数道集进行褶积,形成动校正前的 CDP 道集。

③利用平均速度对合成 CDP 道集做动校正。

④对校平的 CDP 道集做 AVO 分析,得到截距和梯度值。

## 3 物理模型制作参数优选

含煤地层的截距和梯度不仅与煤层界面的反射系数有关,还与处理采样率、子波的参数有关。在本次 AVO 正演模型研究中,上下围岩的参数固定不变,通过改变中间煤层的厚度、子波等参数来讨论对 AVO 响应的影响,发现采用的参数不同,得到的截距和梯度值也有较大差别,具体分析如下。

### 3.1 处理采样率的选取

处理采样率参数决定了模型截距和梯度值的精度。图 2 显示了处理采样率 2ms 和 0.125ms 所对应的 AVO 截距和梯度值与煤层厚度的关系图。在 0~10m,是煤层的调谐效应范围,两种采样率引起的数值相差不是很大;在 10~30m 范围内,两种采样率引

顶板泥岩(厚度无限)		
$v_p=3200\text{m/s}$	$v_s=1700\text{m/s}$	$\rho=2.45\text{g/cm}^3$
煤层(0~30m)		
$v_p=2200\text{m/s}$	$v_s=1050\text{m/s}$	$\rho=1.45\text{g/cm}^3$
底板泥岩(厚度无限)		
$v_p=3200\text{m/s}$	$v_s=1700\text{m/s}$	$\rho=2.45\text{g/cm}^3$

图 1 煤层模型参数

Figure 1 Parameters of coal bed model

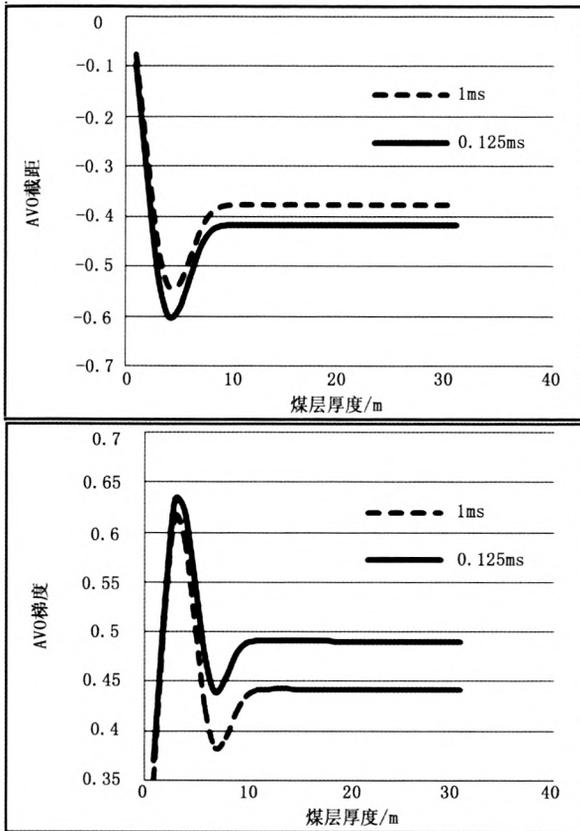


图 2 不同处理采样率时 AVO 截距 (P) 和梯度 (G) 与煤厚关系

Figure 2. Relationships between AVO intercept (P), gradient (G) and coal thicknesses with different processing sample rate

起 AVO 截距和梯度值差异较大,0.125ms 所对应的 AVO 截距和梯度值更接近理论值。因此处理采样率的大小严重影响了 AVO 截距的梯度值的精度。

### 3.2 子波参数的选取

雷克(Ricker)子波形状简单,只有一个正峰,两侧各有一个旁瓣,延续时间很短,收敛快。雷克子波同具有相同振幅谱的子波相比,分辨率最高,而且它的峰值时间就是反射波的到达时间,因此本次正演模型选用雷克子波<sup>[9]</sup>。

在时间域可表示为:

$$f(t)=[1-2(\pi f_p t)^2]\exp[-(\pi f_p t)^2], \quad (4)$$

在频率域可表示为:

$$F(f)=(2/\sqrt{\pi})(f^2/f_p^3)\exp[-(ff_p)^2], \quad (5)$$

$$\theta(f)=0, \quad (6)$$

式中,  $f(t)$  与  $F(f)$  互为付氏变换,  $f_p$  为频谱的峰值频率<sup>[10]</sup>。其图形如图 3 所示。

#### 3.2.1 子波采样率的选取

首先采用子波长度 200ms, 采样率 2ms, 频率 100Hz 的子波求取 AVO 截距和梯度, 如图 4 所示, 梯度出现了比较明显的扰动现象, 近似于正弦曲线的形状。保持其它参数不变, 当把子波采样率改为 0.0625ms 时, 截距和梯度随煤厚变化曲线上的扰动

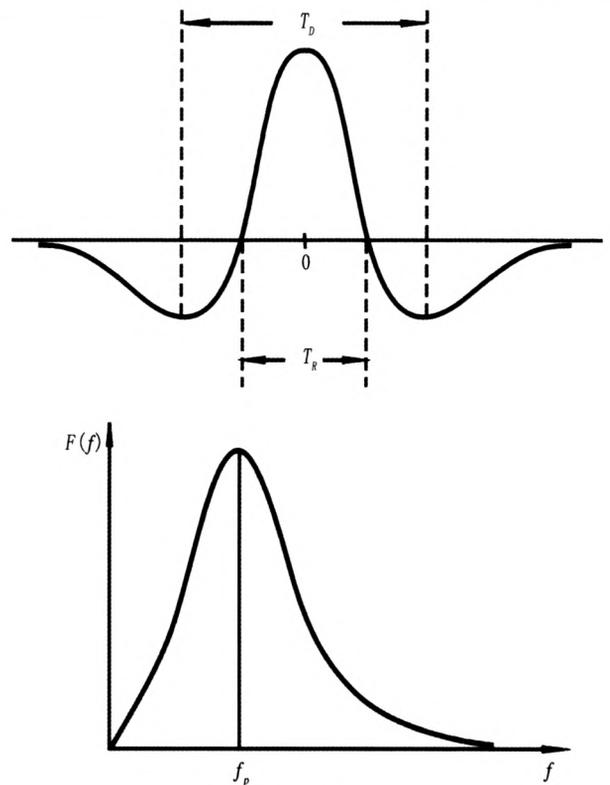


图 3 雷克子波

Figure 3 Rick wavelet

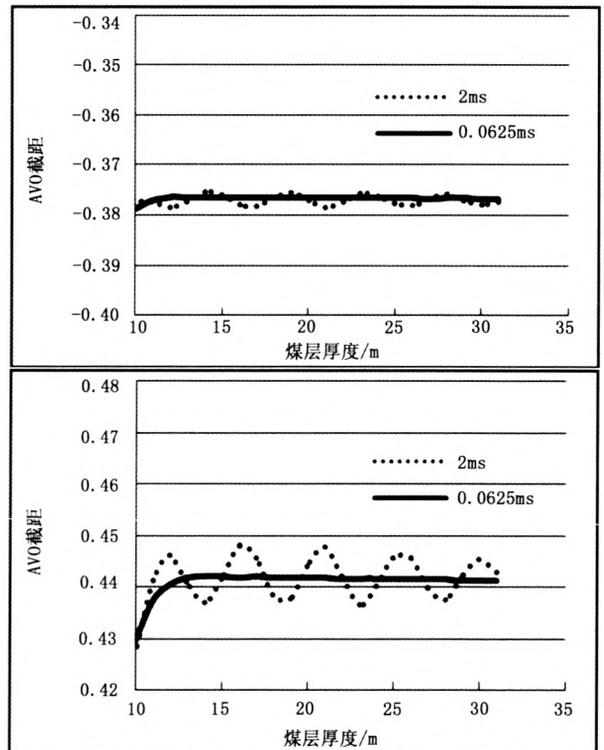


图 4 子波采样率变化引起的 AVO 扰动

Figure 4 AVO fluctuation caused by the changes of wavelet sample rate

现象明显改善,基本上趋于定值。可见,子波的采样率对截距和梯度值精度的影响绝对不能忽视。

#### 3.2.2 子波主频的选取

从图 5 中可以看出, 由于薄层的调谐效应使得

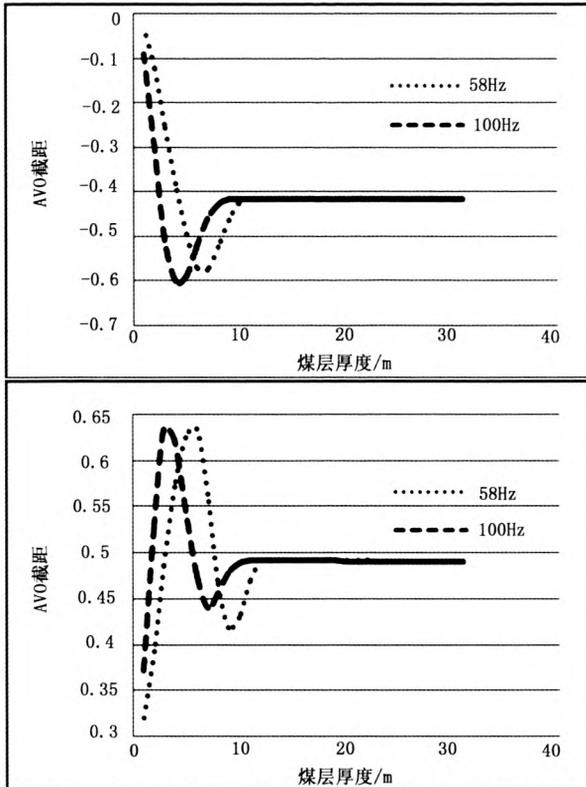


图 5 不同子波主频时 AVO 截距(P)和梯度(G)与煤厚关系

Figure 5 Relationships between AVO P, G and coal thicknesses with different dominant frequency of wavelet

煤层 AVO 的截距和梯度值在一定煤层厚度范围内出现异常,随着厚度的逐渐增加,截距和梯度值逐渐趋于稳定,100Hz 截距和梯度值要比 58Hz 的更早稳定下来。由此可见,即使岩性组合相同,由于厚度的变化,也会引起 AVO 特征的差异,薄层调谐作用对 AVO 特征的影响是相当大的,子波主频不同,所表现出的调谐效应范围也不同,说明提高地震波主频,有利于提高分辨率,与有关垂向分辨率的理论相吻合<sup>[3]</sup>。在具体工作中,应当根据实际子波主频确定薄层调谐范围,以区分由煤层厚度变化所引起的 AVO 异常与真正的岩性差异造成的 AVO 异常。

#### 4 子波长度的选取

本次模型认为子波长度对 AVO 属性的计算影响不大。如图 6 所示,长度为 20ms 的子波和长度为 200ms 的子波基本重合在一起,说明 AVO 截距和梯度值受子波长度的影响较小。

#### 5 结论

①处理采样率的大小的影响含煤地层模型 AVO 截距和梯度值求取的精度,当处理采样率越高时,精度就越高。

②子波采样率过低,会引起 AVO 截距和梯度值的扰动现象;当子波采样率提高到一定程度时,扰动现象消除,AVO 截距和梯度值趋于稳定。

③子波主频的大小决定调谐效应的范围,提高

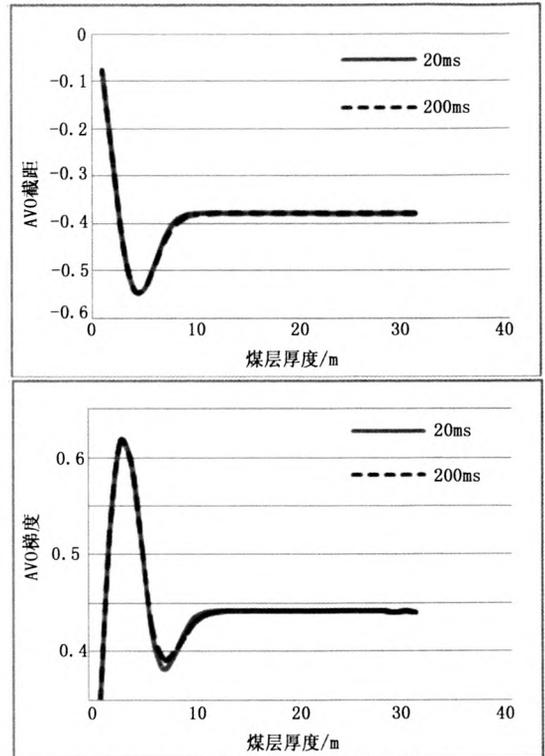


图 6 不同子波长度时 AVO 截距(P)和梯度(G)与煤厚关系

Figure 6 Relationships between AVO P, G and coal thicknesses with different wavelet length

地震波主频,有利于提高分辨率,与有关垂向分辨率的理论相吻合。实际工作中应当注意区分由煤层厚度变化所引起的 AVO 异常与真正的岩性差异造成的 AVO 异常。

④子波长度的变化对 AVO 截距和梯度值求影响不大。

#### 参考文献:

- [1] 郑晓东. AVO 正演方法及其应用[J]. 石油地球物理勘探, 1991, 26(6): 766-776.
- [2] Ramos A C B, T L Davis, 3-D AVO analysis and modeling applied to fracture detection in coalbed methane reservoirs [J]. Geophysics, 1997, 62: 1683-1695.
- [3] 张爱敏, 汪洋, 赵世尊. 不同厚度煤层 AVO 特征及模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(3): 36-41.
- [4] 彭苏萍, 高云峰. 含煤地层振幅随偏移距变化正演模型研究[J]. 科学通报, 2005, 50(s1): 131-137.
- [5] 董守华. 地震资料煤层横向预测与评价方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004: 46-54.
- [6] 刘雯林. 油气田开发地震[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 36-38.
- [7] Shuey R T. A simplification of the Zoeppritz equations [J]. Geophysics, 1985, 50(4): 609-614.
- [8] 殷八斤, 等. AVO 技术的理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 68-71.
- [9] 张海燕, 李庆忠. 几种常用解析子波的特性分析[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(6): 651-657.
- [10] 陆基孟. 地震勘探原理(下册)[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 1993: 312-313.