

非常规天然气

利用地震 AVO 反演预测煤与瓦斯突出区

胡朝元^{1,2}, 彭苏萍¹, 杜文凤¹, 勾精为^{1,2}

(1. 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;

2. 中国煤炭地质总局地球物理勘探研究院, 河北 涿州 072750)

摘要:基于地震 AVO 反演原理和方法, 针对已知的煤与瓦斯突出点进行了 AVO 反演。单点分析发现, 煤与瓦斯突出点处的偏移距—振幅拟合关系的截距和梯度绝对值比非突出点大, 表明煤与瓦斯突出点能引起地震 AVO 响应异常。依据突出点处的地震 AVO 响应特征, 通过交会分析和综合指标分析, 可实现对煤与瓦斯突出区的预测。但是, 作为一项新的预测技术, 在实际应用中要结合区域地质综合分析, 以避免 AVO 反演结果的多解性。

关键词:煤与瓦斯突出; AVO 反演; 地震勘探

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1926(2011)04-0728-05

引用格式: 胡朝元, 彭苏萍, 杜文凤, 等. 利用地震 AVO 反演预测煤与瓦斯突出区[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(4): 728-732.

0 引言

煤与瓦斯突出是影响煤矿安全生产的重大问题之一, 其预测方法主要有地面区域性预测、采面超前探测和巷道瓦斯检测。实践研究证明, 瓦斯突出区煤岩通常是破碎的, 甚至呈粉末状, 且瓦斯含量异常高。因此, 突出区煤岩物性(如波阻抗、密度、剪切模量、弹性模量等)存在异常^[1-2]。这种异常会引起地震勘探中 AVO(Amplitude Versus Offset, 即振幅随偏移距的变化)异常。进一步说, 地震 AVO 反演结果中的异常区可能就是煤岩物性异常区, 即煤与瓦斯突出危险区。

传统的地质预测方法基于钻孔煤岩测试资料、构造、成煤环境等因素, 区域预测精度和针对性差。采面超前探测范围有限、成本高。地震 AVO 勘探提供了瓦斯突出区预测的新技术, 且 AVO 叠前反演比叠后反演有明显的优越性: ①保留了振幅随偏移距变化有关的有用信息, 而当岩石含油气后会引起 AVO 变化异常, 故 AVO 反演结果更有利于油气预测分析; ②以 CDP 道集为基础拟合出零偏移距剖面, 能很好地

反映岩性和流体性质。这种技术在石油、天然气勘探中已有比较成功的应用实例^[3-7]。而在煤层瓦斯突出预测方面仅有煤岩物性实验室测试研究和 AVO 理论预测^[8], 但还没有突出实例对比分析和验证。

实验室理论数学模型和物理模型研究是常用的方法, 但距实际地质条件有一定的差距。本文收集的地震资料是在煤与瓦斯突出之前采集的, 相当于地震勘探预测瓦斯突出的原位试验, 据此探索煤与瓦斯突出区煤岩的地震 AVO 响应。

1 AVO 反演基本原理

AVO 叠前反演是基于模型的地震反演。反演算法有: ①最小平方算法^[9], 这种方法适用于解线性问题, 由于地震反演为非线性反演, 因此使用时需要转化为线性; ②加权叠加法^[10]; ③模拟退火和遗传算法相结合的 Monte Carlo 法, 这是一种新发展起来的方法, 有可能解决非唯一性问题, 但还没有达到商业应用地步。在已知的算法中, 最成熟的算法是最小平方反演法。下面以最小平方反演法来说明

收稿日期: 2010-12-03; 修回日期: 2011-04-27.

基金项目: 国家“973”项目(编号: 2009CB219603; 2009CB72460; 2010CB226800)联合资助.

作者简介: 胡朝元(1963-), 男, 河北石家庄人, 高级工程师, 主要从事三维地震资料解释技术研究. E-mail: hcy0315@sina.com.

通讯作者: 杜文凤. E-mail: duwuf66@126.com.

AVO 反演的基本原理。

以初始地质模型为起点,根据 Zoeppritz 方程或其简化数学模型做正演计算,得到合成地震数据道集。如果结果和实际地震数据不一致就修改模型参数,重新计算。多次重复这个过程,直到正演结果和实际数据一致,这时就认为该地质模型代表了真实的地层情况。

设 $V_{pi}, V_{si}, D_i, \rho_i$ 分别是第 i 层的纵波速度、横波速度、层厚、密度,则地质模型可用向量表示为:

$$\vec{MO} = [V_{p1} V_{p2} \cdots V_{pn+1}, V_{s1} V_{s2} \cdots V_{sn+1}, D_1 D_2 \cdots D_{n+1}, \rho_1 \rho_2 \cdots \rho_{n+1}] \quad (1)$$

如有实际地震数据 CDP 道集,用向量表示:
 $\vec{S} = [S_{11} S_{12} \cdots S_{1n} S_{21} S_{22} \cdots S_{2n} \cdots S_{k1} S_{k2} \cdots S_{kn}] \quad (2)$
式(3)中: S_{ij} 表示第 j 道第 i 个采样点。

由 \vec{MO} 和 Zoeppritz 方程或其简化方程经正演过程合成地震记录 \vec{SO} (其中元素个数和性质与 \vec{S} 相同),如果 \vec{MO} 模型正确, \vec{SO} 就和 \vec{S} 接近,定义其方差函数为:

$$D_s = \sum_{i=1}^{NS} \sum_{j=1}^{NT} (S_{ij} - SO_{ij})^2 \quad (3)$$

反演就是找到模型向量 \vec{MO} 使 D_s 最小,这就是最小平方反演方法。Probe AVO 软件中又增加了参数值范围限制,使收敛速度更快。

在以上反演过程中,多次重复的一步就是正演过程。其主要过程如下:

(1) 决定从炮点到接收点的所有路径,正演时波的传播路径是通过射线追踪实现的。对每一路径用 Zoeppritz 方程(或其简化方程)计算反射系数和旅行时间。

(2) 在频率域:

$$T(f) = \sum r(i) w(f) e^{j2\pi f t_i} \quad (4)$$

式(4)中: $r(i)$ 为反射系数; $w(f)$ 为子波; t_i 为旅行时; f 为频率。

(3) 反傅立叶变换产生最终地震道。

2 实现方法和步骤

2.1 建立地质模型

根据地质资料、测井资料建立地质模型。反演的基础资料包括分层、纵波速度、横波速度、密度以及泊松比等,或地震处理中得到的均方根速度或平均速度等,要结合研究区实际进行选取。

2.2 数学模型选择

AVO 反演最精确的数学模型是 Zoeppritz 方程。该方程复杂,计算量大,国内外专家对此进行简化,达到方便实用的目的。最著名的是 Aki & Richard 和 Shuey 的简化方程。

(1) Aki & Richard 简化方程

$$R(\theta) = 0.5(\Delta V_p/V_p + \Delta \rho/\rho) + [0.5(\Delta V_p/V_p) - 4(V_s^2/V_p^2)] \cdot (\Delta V_s/V_s - 2(V_s^2/V_p^2)(\Delta \rho/\rho)) \sin^2 \theta + 0.5(\Delta V_p/V_p) [\tan^2 \theta - \sin^2 \theta] \quad (5)$$

在入射角较小($< 30^\circ$) 时 $\tan^2 \theta$ 和 $\sin^2 \theta$ 近似相等,可舍去最后一项。设

$$\begin{aligned} R_p &= 0.5(\Delta V_p/V_p + \Delta \rho/\rho), \\ R_s &= 0.5(\Delta V_s/V_s + \Delta \rho/\rho), \\ V_s/V_p &= 0.5 \end{aligned}$$

则 $R(\theta) = R_p + (R_p - 2R_s) \sin^2 \theta \quad (6)$

(2) Shuey 简化方程

$$R(\theta) = R_p + [R_p A_0 + \Delta \sigma / (1 - \sigma)^2] \sin^2 \theta + (\Delta V_p / 2V_p) [\tan^2 \theta - \sin^2 \theta] \quad (7)$$

式中: σ 为泊松比,

$$\begin{aligned} \sigma &= (\sigma_1 + \sigma_2) / 2 \quad (8) \\ \sigma &= (\sigma_2 - \sigma_1) \quad (9) \\ A_0 &= B - 2(1 - B) [(1 - 2\sigma) / (1 - \sigma)] \quad (10) \\ B &= (\Delta V_p / V_p) / (\Delta V_p / V_p + \Delta \rho / \rho) \quad (11) \end{aligned}$$

理论分析表明,当入射角较小时($< 30^\circ$), Aki & Richard 的简化方程和 Shuey 的简化方程可统一简写为: $R(\theta) = R_p + G \sin^2 \theta \quad (12)$

2.3 角道集转换

地震记录道集常以偏移距排列的道集出现,而数学模型(12)是以入射角为变量的。所以,需要将偏移距排列的道集转换成角道集。

设入射角为 θ , 偏移距为 X , 目的层反射波传播速度(均方根速度或平均速度)为 V , 零偏移距旅行时为 T_0 , 则 $\tan \theta = X / VT_0 \quad (13)$

给定 CDP 道集 $R(t, X)$ (t 为反射时间, X 为偏移距), 根据式(13) 由均方根速度模型转角道集 $R(t, \theta)$, 使输入的偏移距排列的道集转换为角道集。

2.4 参数反演

根据实际角道集数据, 利用式(12) 可得:

$$\begin{bmatrix} R(\theta_1) \\ R(\theta_2) \\ R(\theta_3) \\ \vdots \\ R(\theta_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin^2 \theta_1 \\ 1 & \sin^2 \theta_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \sin^2 \theta_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_p \\ G \end{bmatrix} \quad (14)$$

用最小平方解方程组(14)就得到截距 R_p 和梯度 G 。截距 R_p 和梯度 G 是最基本的属性参数。

结合地震角道集数据,利用最小平方反演法可以反演出多种属性参数。

(1)Aki & Richard 算法反演出的属性。

纵波波阻抗反射系数

$$\Delta(V_p \times \rho)/(V_p \times \rho) \tag{15}$$

横波波阻抗反射系数

$$\Delta(V_s \times \rho)/(V_s \times \rho) \tag{16}$$

纵波速度反射系数

$$\Delta V_p/V_p \tag{17}$$

密度反射系数

$$\Delta \rho/\rho = 0.25(\Delta V_p/V_p) \tag{18}$$

横波速度反射系数

$$\Delta V_s/V_s \tag{19}$$

拟泊松比反射系数

$$(\Delta V_p/V_p) - (\Delta V_s/V_s) \tag{20}$$

流体因子

$$(\Delta V_p/V_p) - (1/\alpha) \times (V_s/V_p) \times (\Delta V_s/V_s) \tag{21}$$

(2)Shuey 算法反演出的属性。

拉梅常数和密度乘积反射系数

$$\Delta(\lambda \times \rho)/\lambda \times \rho \tag{22}$$

泊松比反射系数

$$(\Delta \sigma)/(1 - \sigma)^2 \tag{23}$$

剪切模量和密度乘积反射系数

$$\Delta(\mu \times \rho)/\mu \times \rho \tag{24}$$

3 应用实例分析

3.1 概况

淮南矿区矿井均属高瓦斯、煤与瓦斯突出矿井,并且煤与瓦斯突出危险日趋严重。高瓦斯煤层瓦斯含量一般为 $10 \sim 22 \text{ m}^3/\text{t}$,煤与瓦斯突出多属压出和倾出,最大突出煤量为 78.3 t ,最大瓦斯涌出量为 $10\,168 \text{ m}^3$ 。大部分煤与瓦斯突出发生在垂深 670 m 左右,瓦斯含量高且发生在构造煤或小构造(小断层和小褶曲)及其组合的部位。

为研究煤与瓦斯突出区煤岩物性和地震 AVO 属性之间的关系,在淮南矿区潘三矿选择 2 条有煤和瓦斯突出事件的二维地震线(图 1)进行研究。二维地震勘探数据采集和处理时间为 1989 年 1 月和 1991 年 6 月。G5 线瓦斯突出发生的时间为 2002 年 11 月 25 日,G2 线瓦斯突出发生的时间为 1994 年 3 月 25 日。对所选二维地震线重新解编、保幅处理,按研究区实际情况设置反演参数后做 AVO 反演分析。

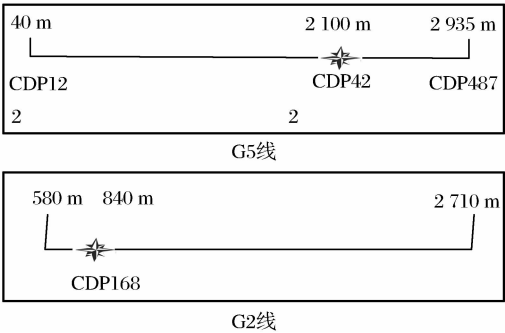


图 1 瓦斯突出点示意

3.2 反演参数确定

AVO 属性缺省值反演暗含以下假设:

(1)纵波与横波速度比

$$k = V_p/V_s = 2 \tag{25}$$

(2) 引用 Gardner 公式

$$\rho = aV^b \tag{26}$$

式中: $a = 0.23, b = 0.25$ 。

(3) 泥岩速度线性公式

$$V_p = 1.16V_s + 1\,360 \tag{27}$$

反演时应该选择研究区相应的岩石物性参数。

在淮南地区,煤层纵横波速度关系^[11]为:

$$V_p = 1.923V_s + 87.1 \tag{28}$$

所以, k 应该为 1.923,与假设经验值接近。

研究区流体因子计算公式为:

$$\Delta F = 1.0185 \times I + 0.9615 \times G \tag{29}$$

煤层密度和速度的关系为:

$$\rho = 0.369\,9V_p^{0.174} \tag{30}$$

3.3 AVO 反演结果分析

(1)常规地震叠加剖面:在常规地震叠加剖面图上(图 2),煤与瓦斯突出点有一定反映,但不易区别。

(2)反演剖面:根据研究区实际参数反演出 12 种属性体。经过比较分析,发现以下属性剖面上 AVO 的响应明显,即小入射角和中入射角叠加剖面、截距剖面、梯度剖面、纵波波阻抗反射系数剖面、纵波速度

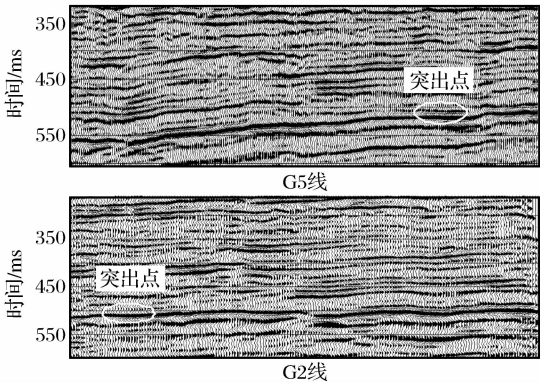


图 2 G5 线和 G2 线叠加剖面

反射系数剖面、剪切模量与密度乘积反射系数剖面。图 3 和图 4 分别为 G2 线和 G5 线的剪切模量与密度乘积反射系数剖面,瓦斯突出点响应明显。

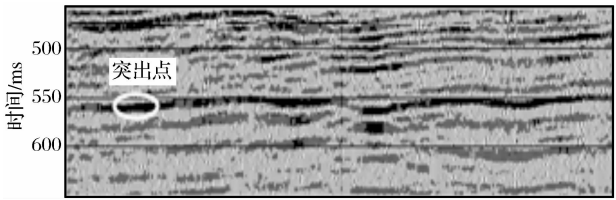


图 3 G2 线剪切模量与密度乘积反射系数剖面

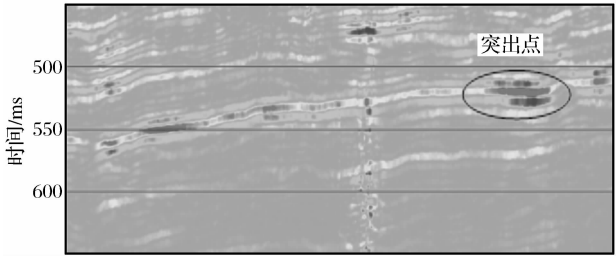


图 4 G5 线剪切模量与密度乘积反射系数剖面

(3)单点 AVO 分析:单点 AVO 分析是在 CDP 道集上完成的。图 5 是突出点和非突出点 AVO 响应对比。其中,图 5a 为非突出点,图 5b 为突出点。

由图 5 看出:非突出点垂直入射反射系数(5.05)、梯度(-19.5)的绝对值较小, $\text{Mu} \times \text{Rho}$ (48.2)和流体因子(-16.0)的绝对值低等。突出点垂直入射反射系数大(7.76),梯度(-24.5)绝对值高, $\text{Mu} \times \text{Rho}$ (64.6)、流体因子(-19.1)绝对值相对较大。

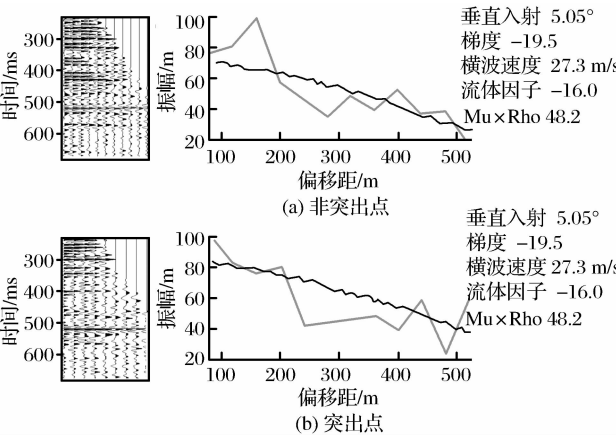


图 5 非突出点和突出点 AVO 响应对比

煤与瓦斯突出点和非突出点煤层底界面 AVO 曲线都是随着偏移距的增大而减小,但突出点处的截距和梯度绝对值比非突出点大。

(4)交会分析:交会分析是常用的分析 2 种属性间关系的有效方法。图 6 为 G5 线的近道叠加剖面与流体因子剖面交会图。首先在属性剖面上标出已知点(即突出点),自动就能找出已知点在交会图上

的散点位置。然后,在交会图上圈出异常范围,反过来在属性剖面上就可预测出与已知点 AVO 特征类似的部位,这样就能容易预测其他异常范围。

(5)综合指标分析:单点分析和交会分析是很有效的方法。但当一个结果由多个因素共同作用时,综合指标分析会比单点分析和交会分析更加客观。

AVO 综合指标分析方法是在地震剖面上沿目的煤层上下开 5 ms 的时窗,提取各种属性值。然后,对每种属性做数据归一化,使数值处于(0,1)之间。最后,对同一 CDP 点各属性绝对值求和,进而作出突出危险性综合指标图。

图 7 和图 8 是利用 AVO 综合指标分析方法获得的 G2 线和 G5 线瓦斯突出危险性综合指标图。

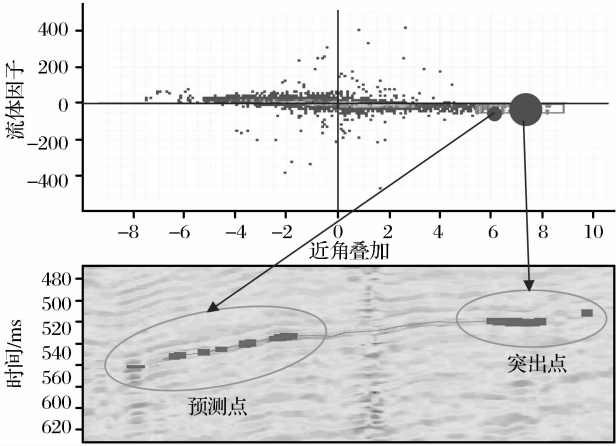


图 6 G5 线近道叠加剖面与流体因子剖面交会特征

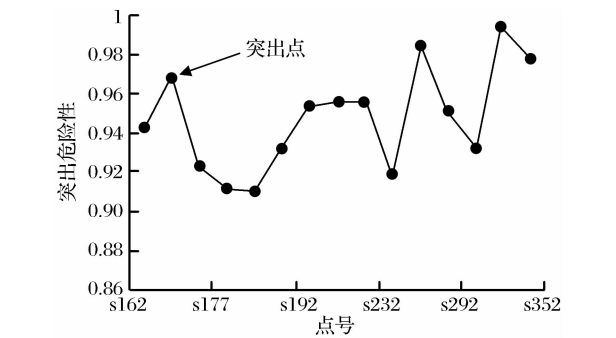


图 7 G2 线 AVO 属性综合指标

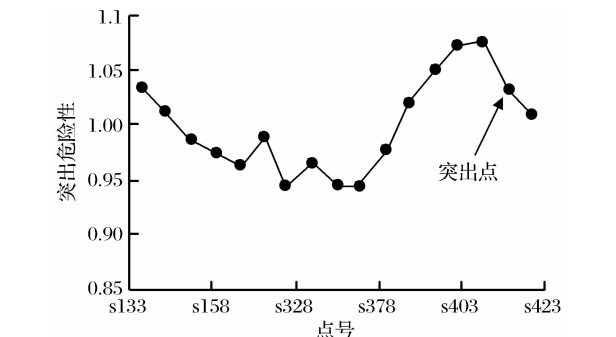


图 8 G5 线 AVO 属性综合指标

G2 线瓦斯突出点的综合指标为 0.97, G5 线瓦斯突出点的综合指标为 1.03, 可见突出点的综合指数较高。

4 结 论

(1) 对已知煤与瓦斯突出点 AVO 反演分析发现, 煤与瓦斯突出点处的偏移距—振幅拟合关系的截距和梯度绝对值比非突出点大, 表明煤与瓦斯突出点能引起地震 AVO 响应异常。

(2) 依据突出点处的地震 AVO 响应特征, 通过交会分析和综合指标分析, 可实现煤与瓦斯突出区的预测。

(3) 地震 AVO 反演方法作为预测煤和瓦斯突出区的一项新技术, 在实际应用中要结合区域地质条件综合分析, 以避免 AVO 反演结果的多解性。

参考文献 (References):

- [1] He Jishan, Lv Shaolin. Outburst of Geophysical Research[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1999. [何继善, 吕绍林. 瓦斯突出地球物理研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.]
- [2] Liang Handong. The chemical nature of coal and gas outburst [C]//The Mine Geological Assurance System for China's High-efficiency Coal Mines. Beijing: Coal Industry Press, 2001: 147-157. [梁汉东. 煤与瓦斯突出的化学本质[C]//煤矿安全高效开采地质保障系统. 北京: 煤炭工业出版社, 2001: 147-157.]
- [3] Brian H Russell, Ken Hedlin, Fred J Hilterman, *et al.* Fluid-property discrimination with AVO: A Biot-Gassmann perspective[J]. Geophysics, 2003, 68(1): 29-39.
- [4] He Chen, John P Castagna, Raymon L Brown, *et al.* Three-parameter AVO crossplotting in anisotropic media[J]. Geophysics, 2001, 66(5): 1359-1363.
- [5] Chuck Skidmore, Mike Kelly, Ray cotton. AVO inversion, part2: Isolating rock property contrasts [J]. The Leading Edge, 2001, 20(4): 425-428.
- [6] Chen Jianyang, Zhang Zhijie, Yu Xinghe. AVO technique in the application and problem of hydrate research[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(1): 123-126. [陈建阳, 张志杰, 于兴河. AVO 技术在水合物研究中的应用及应注意的问题[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(1): 123-126.]
- [7] Mo Wuling, Wu Chaodong. Multi-azimuthal AVO analysis of fractured reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(6): 813-818. [莫午零, 吴朝东. 裂缝介质中多方位 AVO 特征分析技术及应用举例[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(6): 813-818.]
- [8] Fu Xuehai, Qin Yong. Coalbed Methane Reservoir Permeability of Multiphase Medium Theory and Method of Prediction [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003. [傅雪海, 秦勇. 多相介质煤层气储层渗透率预测理论与方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.]
- [9] Gassaway G S, Richgels H J. Sample: Seismic amplitude measurement for primary lithology estimation [C]//53rd Ann. Internat. Mtg. , Soc. Expl. Geophys, Expanded Abstracts, 1983: 610-613.
- [10] Smith G C, Gidlow P M. Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas[J]. Geophysical Prospecting, 1987, 35: 993-1014.
- [11] Gao Yunfeng. Application of AVO Technique in Prediction of Coalbed Gas Outburst Region[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2003. [高云峰. AVO 技术在煤层瓦斯突出区预测中的应用[D]. 北京: 中国矿业大学, 2003.]

Seismic AVO Inversion and Coal-gas Outburst Area Prediction

HU Chao-yuan^{1,2}, PENG Su-ping¹, DU Wen-feng¹, GOU Jing-wei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Coal Geophysical Exploration, China National Administration of Coal Geology, Zhuozhou 072750, China)

Abstract: Based on principle and method of seismic AVO inversion, the inversion for some known coal-gas outburst points is integrated. Single point analysis shows that the absolute AVO intercept and gradient at the coal-gas outburst point is greater than that at the non-outburst point, suggesting that the AVO abnormality would be resulted from coal-gas outburst points. According to AVO response at the coal-gas outburst points, the prediction of coal-gas outburst area is gotten by AVO crossplot and integrative index. As a new predicting technology, the comprehensive analysis of the regional geology should be involved practically so as to avoid the multi-solutions of AVO inversion.

Key words: Coal-gas outburst; AVO inversion; Seismic exploration.