

煤层气储层物性预测的 AVO 技术对地震纵波资料品质要求的探讨

常锁亮^{1,3}, 杨起¹, 刘大锰¹, 刘洋², 李国发², 索重辉^{2,3}

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国石油大学(北京), 北京 102200; 3. 山西山地物探技术有限公司, 晋中 030600)

摘要 煤层的含气性及渗透性可以利用纵波 AVO 技术及基于各向异性理论的方位 AVO 技术进行研究. 煤层气属于吸附气, 储层厚度较薄, 地震异常响应较弱, 对地震资料的品质及其携带的信息量提出了更高的要求. 本文对 AVO 与方位 AVO 反演理论的近似条件及模型试算结果进行了分析, 提出了对地震纵波数据信噪比、入射角、偏移距分布及方位角分布等参数的要求: 1. 观测系统设计及野外采集时应保证地震波的有效入射角在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 或更大范围内, 偏移距应大中小均匀分布, 避免过于集中或缺失. 2. 地震数据应有足够宽分布的方位角, 煤层气地震勘探中应选择宽方位观测系统. 3. 地震资料信噪比应足够高.

关键词 煤层气, 含气性及渗透性, AVO 与方位 AVO, 信噪比, 入射角, 方位角

中图分类号 P631 **文献标识码** A **文章编号** 1004-2903(2008)04-1236-08

The discussion of required P-wave quality for the AVO technology based on the CBM reservoir research

CHANG Suo-liang^{1,3}, YANG Qi¹, LIU Da-meng¹, LIU Yang², Li Guo-fa², Suo Chong-hui^{2,3}

(1. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 2. China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102200, China; 3. Shanxi Shandi Geophy-Tech Co., Ltd, Jinzhong 030600, China)

Abstract The gas content and permeability of coal can be researched by the technology of P-wave AVO and azimuthal AVO which based on the anisotropy theory. Because CBM is the rock-absorbed gas, its reservoir is thin and its seismic anomalous response is weak, higher quality seismic data become essential and more important. In this paper, AVO and Azimuthal AVO forward model trial calculation and inversion model approximate condition analyzing show that the CBM reservoir characters are more sensitive to the parameters of the S/N, distribution of angle of incidence, distribution of azimuth, distribution of offset of seismic data. So, 1 it should be insured that the angle of incidence of the geometry is between $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ or more, and the offset should be uniform distribution, 2 seismic data should be with a wide enough azimuth scope, 3 the S/N should be high enough.

Keywords CBM, gas content and permeability, AVO and azimuthal AVO, S/N, angle of incidence, azimuth

0 引言

煤层的含气性及渗透性是煤层气勘探开发及资源评价的重要参数. 我国煤层气储层具有强烈的非均质性 & 含气饱和度低、渗透率低、地层压力低的特性^[1,2]. 因此加强储层特征研究, 预测煤层气的富集区和高渗区显得尤为重要. 有关研究^[3~9]表明: 一方

面, 煤层气富集将引起煤的体积密度减小, 同时对弹性模量、泊松比、弹性波速度、频谱特征、衰减系数、品质因子等弹性力学参数及弹性波特征具有明显的影响. 另一方面, 煤层的渗透性好坏很大程度上取决于煤的裂隙系统的发育情况. 而裂缝、裂隙(割理)是煤系地层中广泛存在的地质现象, 煤层具有裂隙密度高, 各向异性较强等特征, 煤层裂隙的存在将导致

收稿日期 2008-01-10; **修回日期** 2008-03-20.

基金项目 国家自然科学基金项目(40572091)、国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA06Z218)、国家重点基础研究发展计划课题项目(2006CB202202, 2002CB211702)、中国地质调查局项目(20021010004, 1212010534702)资助.

作者简介 常锁亮, 男, 1972 年生, 山西灵石人, 高级工程师, 博士研究生. (E-mail: gewtcs@163.com)

煤层的方向各向异性. 煤层气富集高渗区的这些特征为利用含有丰富信息的地震资料研究煤层气储层物性奠定了基础.

目前,以探测煤层赋存状态、构造形态、断层发育特征,定性、半定量地解释煤层厚度为主要目的的二维地震勘探技术已广泛应用于煤层气勘探评价,并发挥了重要作用^[10]. 利用地震纵波叠后反演技术、AVO 与方位 AVO 反演技术及属性分析技术等针对煤层气开发的储层含气性与渗透性研究近几年也受到了不少学者^[11~31]的重视并取得了较大进展. 如 Ramos 等进行了煤层瓦斯储集层裂隙探测的 AVO 分析和模拟; David Gray 利用方位 AVO 技术预测了煤的各向异性; 高云峰把 AVO 技术应用于煤层瓦斯富集部位的检测; 董守华对煤样的各向异性系数进行了测试; 彭苏萍等对淮南煤田地震资料的研究初步建立了裂缝发育程度和煤层气富集的预测方法; 刘洋等利用沁水盆地山区地震资料预测煤层气富集与裂隙检测的 AVO 及方位 AVO 技术进行了研究等. 以上研究表明利用纵波 AVO 技术及基于各向异性理论的方位 AVO 技术开展煤储层含气性及渗透性预测具有良好的发展潜力.

但煤层气属于吸附气,加之储层厚度较薄,地震异常响应较弱,因此相对于油气与煤田勘探而言,以煤层气储层物性研究为目的地震勘探对资料的品质及其携带的信息量提出了更高要求,勘探难度更大. 本文对 AVO 与方位 AVO 反演理论的近似条件及初步模型试算结果进行了分析,提出了对地震纵波数据的信噪比、入射角(偏移距)分布及方位角分布等资料品质及信息量的要求.

1 AVO 技术对入射角(偏移距)的要求

AVO 技术研究的是地震波振幅随偏移距变化的规律,影响反射振幅随炮检距变化的最主要因素是介质的泊松比,其次才是速度. AVO 响应实际是地层泊松比异常的反映. 通过 AVO 分析计算可得到梯度、截距、泊松比等参数. 由于煤层气富集将引起煤层泊松比增大、弹性模量降低等变化^[12,21,25],因此 AVO 技术可用来研究煤层的含气性. 目前工业界广泛采用的 AVO 属性处理基本公式(1)为 Shuey 在入射角小于 30°时由佐普里兹方程简化得出的:

$$A = P + G \sin^2 \theta, \quad (1)$$

式中, P 为截距,即法线入射时的反射波振幅,与煤层厚度及顶底板岩性有关; G 为斜率,即梯度,反映

了振幅随偏移距的变化率,与煤层泊松比变化(含气性)有关; θ 为地震波的入射角. 式(1)表示不同入射角下的反射系数近似地与 $\sin^2 \theta$ 呈线性关系.

文献[27]对角道集内的偏移距分布与 AVO 属性 P 和 G 求取的可靠性进行了分析,指出(a)偏移距分布应均匀. 如果过于集中在某一小段偏移距范围内,提取的属性 G 可靠性就降低,不能更准确地反映地震波振幅的变化趋势, G 的可靠性降低进而增大了属性 P 的误差;(b)最小偏移距应尽可能小,否则拟合出的属性 G 和 P 的误差将增大. 文献[28]通过对煤层及其顶底板岩性不同组合模型的反射系数与入射角的关系正演模拟,表明当入射角较小时,反射纵波可近似认为自激自收、反射系数基本不随偏移距(入射角)变化;随着入射角的增大而反射系数减小,并且随着入射角的增大,反射系数对入射角反应越灵敏,AVO 特征越突出. 因此对煤层作 AVO 分析时还应有足够的大偏移距信息.

综合上述分析,为满足 AVO 技术预测煤层气富集程度的有效性,煤层气勘探中观测系统设计及野外采集时应保证地震波的有效入射角在 0°~30°或更大范围内,且偏移距也应大中小均匀分布,避免偏移距过于集中或缺失.

2 方位 AVO 技术对测线方位角范围的要求

由于煤层中割理裂隙发育,方向各向异性强,可以用各向异性理论中具有水平对称轴的横向各向同性(即 HTI 介质)介质模型进行研究. Ruger(1998)推导出了 HTI 介质在入射角较小时方位 AVO 反射系数近似表达式(2):

$$\begin{aligned} R_{pp}(\theta, \varphi) &= P + G(\varphi) \sin^2 \theta \\ &= P + [G_{\text{iso}} + G_{\text{ani}} \cos^2(\varphi - \varphi_{\text{sym}})] \sin^2 \theta, \end{aligned} \quad (2)$$

其中: θ 为入射角, φ 为炮检方位角, φ_{sym} 为 HTI 介质对称轴的方位, P 表示纵波垂直入射时的反射振幅; G_{iso} 为振幅随偏移距的变化率(各向同性梯度),它指示了介质各向同性部分的影响; G_{ani} 为振幅随偏移距和方位角的变化率(各向异性梯度),它指示了介质各向异性部分的影响.

为考察方位 AVO 反演的影响因素,以沁水盆地 MB 区块煤系地层参数为依据,设计了如图 1 所示介质模型,模型上覆介质为各向同性层,下伏介质为 HTI 介质(煤层). 各向同性介质纵波速度为 3500 m/s, HTI 介质中纵波垂直速度为 2500 m/s,快横波速度为 1200 m/s,两层介质的其它参数如



图1 模型示意图
Fig.1 Schematic model

表1 图1模型相关参数

Table 1 Model parameters for Figure 1

参数	$\frac{\Delta Z}{Z}$	$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$	$\frac{\Delta\mu}{\mu}$	$\frac{\bar{\beta}}{\alpha}$	$\Delta\delta^{(V)}$	$\Delta\gamma$
数值	0.12	0.12	0.12	0.45	0.07	0.07

表1所示. 所设计模型反射时间为 0.3 s, 子波主频 50 Hz, 子波延续时间 0.03 s, 界面深度 400 m, 最小炮检距 40 m, 最大炮检距 980 m, 覆盖次数 48 次, 设计了 10×10 个面元, 每个面元内炮检距均匀分布.

则理论上:

$$P = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{Z} = 0.06,$$

$$G_{\text{iso}} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta\alpha}{\alpha} - \left(\frac{2\bar{\beta}}{\alpha} \right)^2 \frac{\Delta\mu}{\mu} \right] = 0.5 \times (0.12 - 0.81 \times 0.12) = 0.0114,$$

$$G_{\text{ani}} = \frac{1}{2} \left[\Delta\delta^{(V)} + 2 \left(\frac{2\bar{\beta}}{\alpha} \right)^2 \Delta\gamma \right] = 0.5 \times (0.07 + 2 \times 0.81 \times 0.07) = 0.0917.$$

为了检测测线方位角范围对反演结果的影响, 设计了如下几种观测方位角范围, 分别为: $(-90^\circ \sim 90^\circ)$ 、 $(-60^\circ \sim 60^\circ)$ 、 $(-45^\circ \sim 45^\circ)$ 、 $(-30^\circ \sim 30^\circ)$ 、 $(-20^\circ \sim 20^\circ)$ 、 $(-10^\circ \sim 10^\circ)$ 等, HTI 介质对称轴方位角为 30° . 图 2、3、4、5 为相关反演结果, 图中测线方位角范围由左向右依次为 $(-90^\circ \sim 90^\circ)$ 、 $(-60^\circ \sim 60^\circ)$ 、 $(-45^\circ \sim 45^\circ)$ 、 $(-30^\circ \sim 30^\circ)$ 、 $(-20^\circ \sim 20^\circ)$ 、 $(-10^\circ \sim 10^\circ)$.

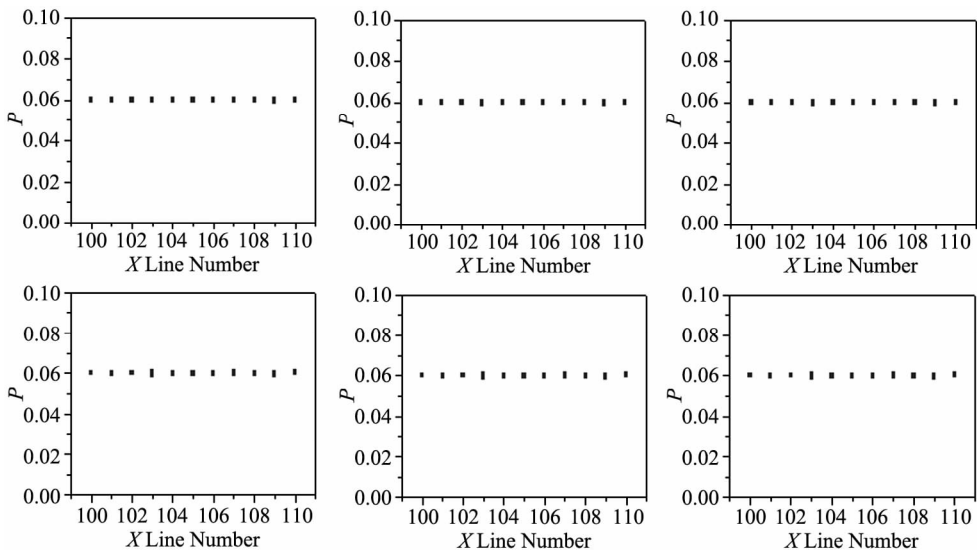


图2 测线方位角范围对垂直反射系数反演结果的影响(真实 P 值为 0.06)

Fig.2 The effect of Surveyline azimuth scope on the inversion results(The accurate value of P is 0.06)

由图可见, 方位角范围的变化对 P 值和 G_{iso} 值反演精度影响较小, 对 φ_{sym} 值和 G_{ani} 值反演精度影响较大. 就本模型而言, 当方位角范围小于 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 时, φ_{sym} 值和 G_{ani} 值反演精度将大幅降低, 即方位 AVO 反演预测的裂隙方位与发育程度的精度将大幅降低. 因此利用方位 AVO 反演技术预测煤层的裂隙方位与裂隙发育程度需要采集的地震数据有足够宽分布的方位角, 煤层气三维地震勘探中应选择宽方位观测系统.

3 AVO 及方位 AVO 技术对信噪比的要求

为了检测资料品质对 AVO 及方位 AVO 反演的影响, 设计了如图 6 所示的不同信噪比模型, 信噪比依次为: 8、4、2、1. HTI 介质的对称轴方向方位角 $\varphi_{\text{sym}} = 60^\circ$, 观测方位角均匀分布在 0° 到 360° 之间. 图 7、8、9、10 为反演结果对比图, 图中由左至右信噪比依次为: 8、4、2、1.

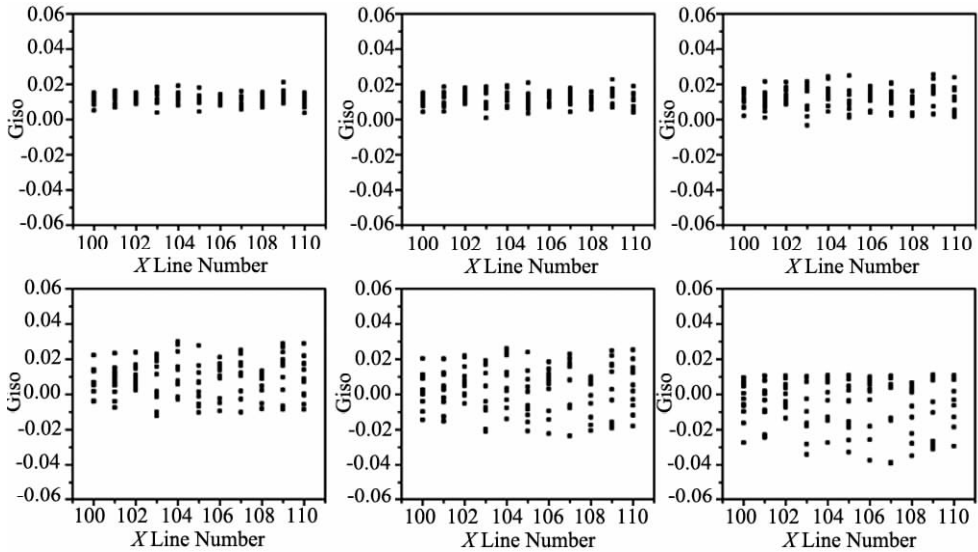


图 3 测线方位角范围对各向同性梯度反演结果的影响(真实 G_{iso} 为 0.0114)

Fig. 3 The effect of Surveyline azimuth scope on the inversion results(The accurate value of G_{iso} is 0.0114)

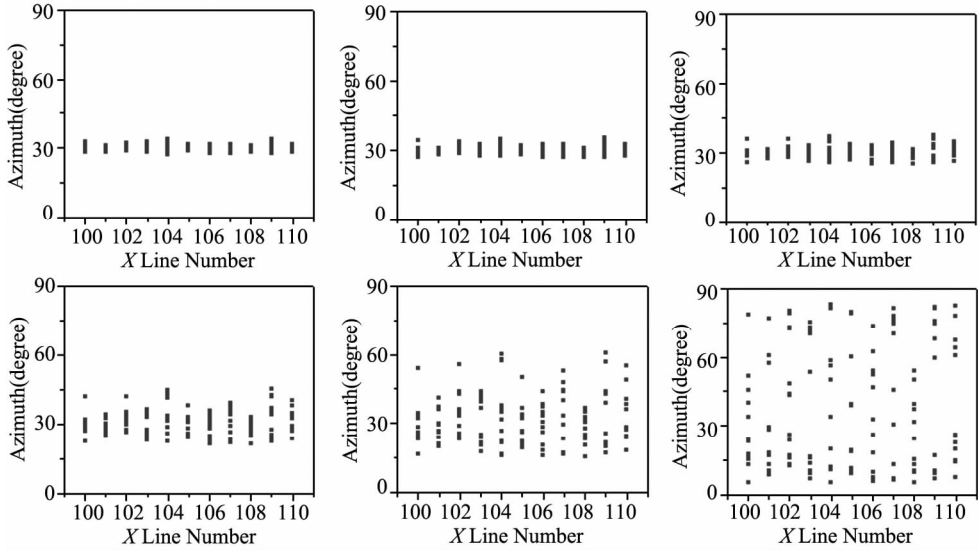


图 4 测线方位角范围对 HTI 介质对称轴方位反演结果的影响(真实 φ_{sym} 为 30°)

Fig. 4 The effect of Surveyline azimuth scope on the inversion results(The accurate value of φ_{sym} is 30°)

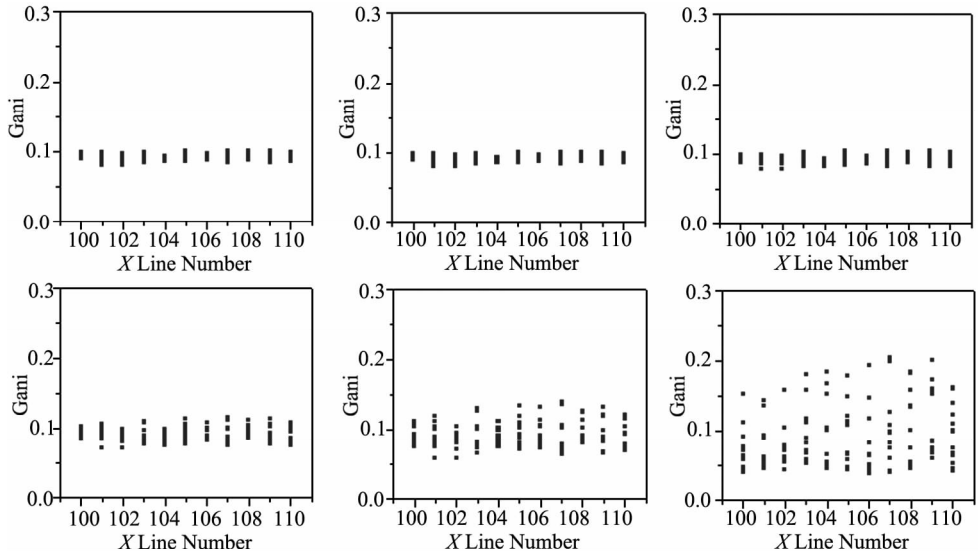


图 5 测线方位角范围对各向异性梯度反演结果的影响(真实 G_{ani} 为 0.0917)

Fig. 5 The effect of Surveyline azimuth scope on the inversion results(The accurate value of G_{ani} is 0.0917)

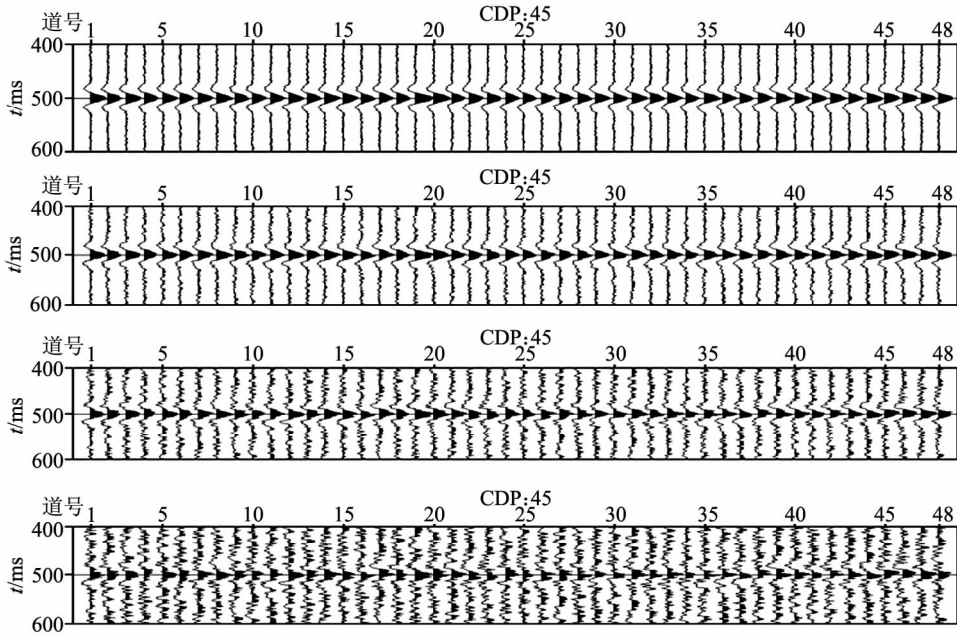


图 6 不同信噪比合成记录(由上至下信噪比依次为:8、4、2、1)

Fig. 6 Synthesis records of various S/N ratio(S/N ratio from top to bottom:8,4,2,1)

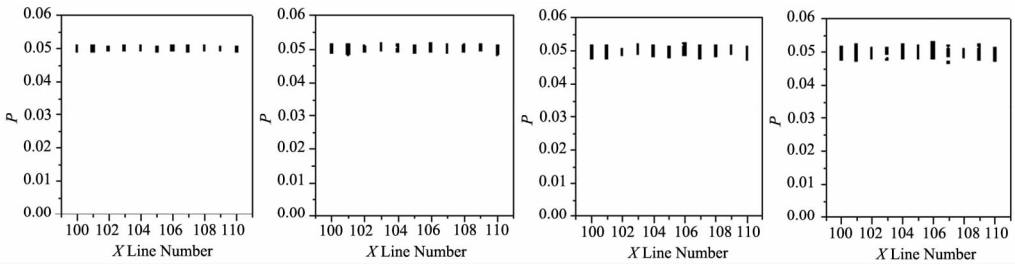


图 7 对图 6 进行反演得到的 P 值(真实值为 0.05)

Fig. 7 The inversion value P from Fig. 6(The accurate value is 0.05)

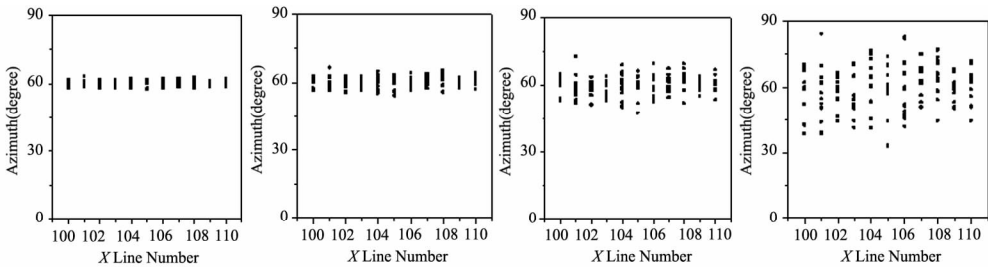


图 8 对图 6 进行反演得到的 φsym 值(真实值为 60°)

Fig. 8 The inversion value φsym from Fig. 6(The accurate value is 60°)

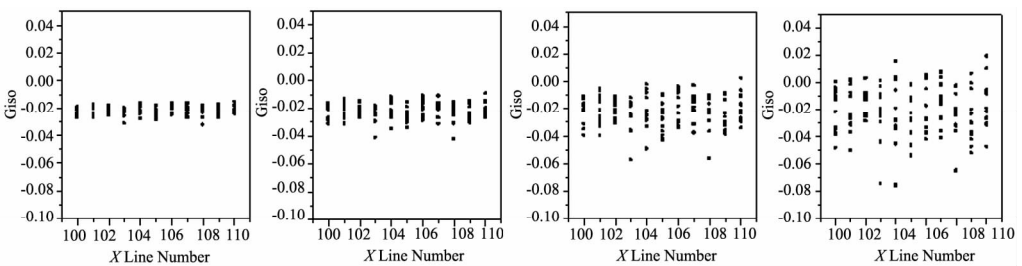


图 9 对图 6 进行反演得到的 Giso 值(真实值为 -0.022)

Fig. 9 The inversion value Giso from Fig. 6(The accurate value is -0.022)

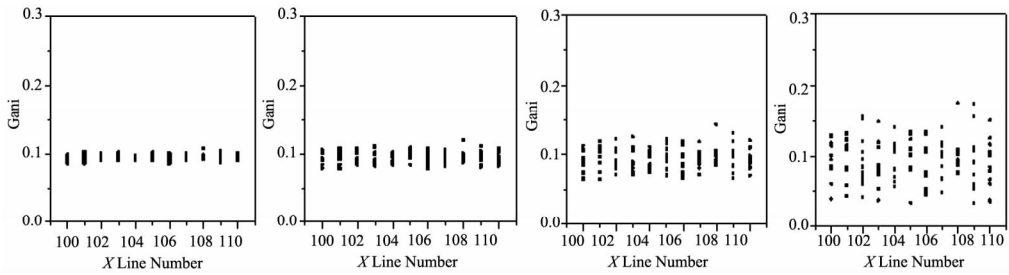


图 10 对图 6 进行反演得到的 G_{ani} 值(真实值为 0.097)

Fig. 10 The inversion value G_{ani} from Fig. 6(The accurate value is 0.097)

由图可见,随着信噪比的降低,各参数的反演精度均有所降低,其中, P 值相对于另外几个参数而言具有较好的抗噪能力. 当信噪比小于 2 时, φ_{sym} 值、 G_{iso} 值和 G_{ani} 值误差很大,即 AVO 与方位 AVO 反演预测的精度难以反映真实情况. 因此煤层气储层研究对地震资料品质提出了更高的要求,信噪比应足够高. 由于 AVO 与方位 AVO 分析是以叠前角道集为基础进行的,因此对信噪比的要求是指叠加之前的. 野外采集中必须采取相应的措施,通过提高单炮质量及覆盖次数提高资料信噪比.

4 应用实例

沁水盆地某矿三维工区采集的资料基本满足上述要求,利用 AVO 技术开展了煤层的含气性预测试验研究;根据资料特点抽取了方位角分别为 45° 、 90° 、 135° 的 3 个数据体,利用方位 AVO 技术开展了煤层的渗透性预测试验研究. 试验区内与周边已有

4 个钻孔,岩芯测试主力煤层 3 号煤气量分别为 0603 孔 $18.54 \text{ mL/g} \cdot \text{r}$,0602 孔 $7.80 \text{ mL/g} \cdot \text{r}$,00705 孔 $5.80 \text{ mL/g} \cdot \text{r}$,0807 孔 $7.25 \text{ mL/g} \cdot \text{r}$,存在较大差别.

图 11 为 AVO 反演得到的 3 号煤层伪泊松比平面图. 可以看出,在钻孔处泊松比与含气量对应较好,其平面分布也有一定的规律性. 高泊松比分布区与构造形态及构造分布总体上对应关系明显,在向斜轴部及翘起端和背斜翼部相对较高、在逆断层的下降盘相对较高、在背斜轴部和陷落柱附近相对较低.

图 12 为方位 AVO 反演得到的 3 号煤层各向异性强度平面分布图,可以看出各向异性强度总体表现为褶曲转折部位及断层两侧各向异性强. 推断这些区域可能是裂隙发育区(煤层气高渗区).

本次试验区预测结果符合煤层气高渗富集理论,表明采集资料品质满足要求时利用 AVO 及方位 AVO 技术预测煤层含气性和渗透性具有良好前景.

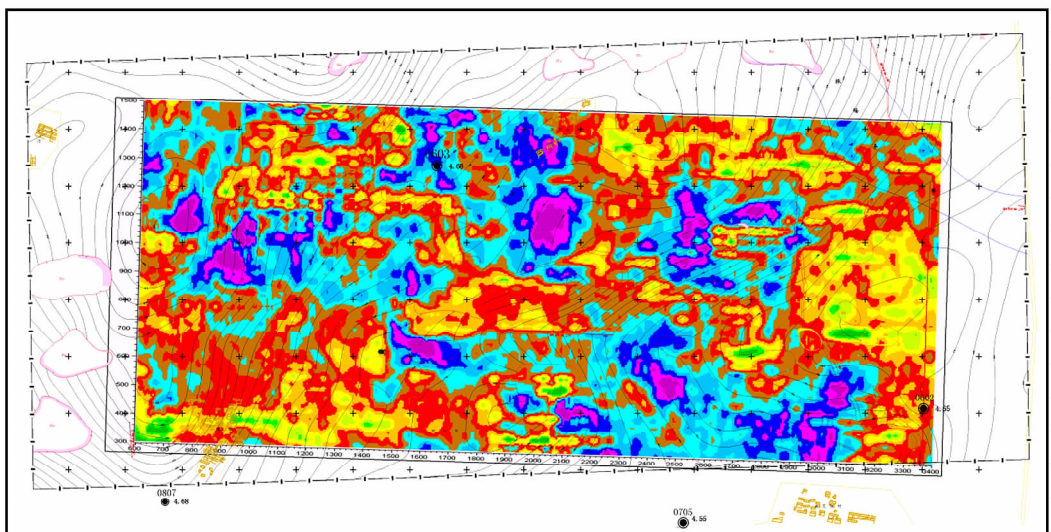


图 11 AVO 反演得到的 3 号煤层伪泊松比平面分布图

Fig. 11 No. 3 coal seam pseudo-Poisson ratio map from AVO inversion

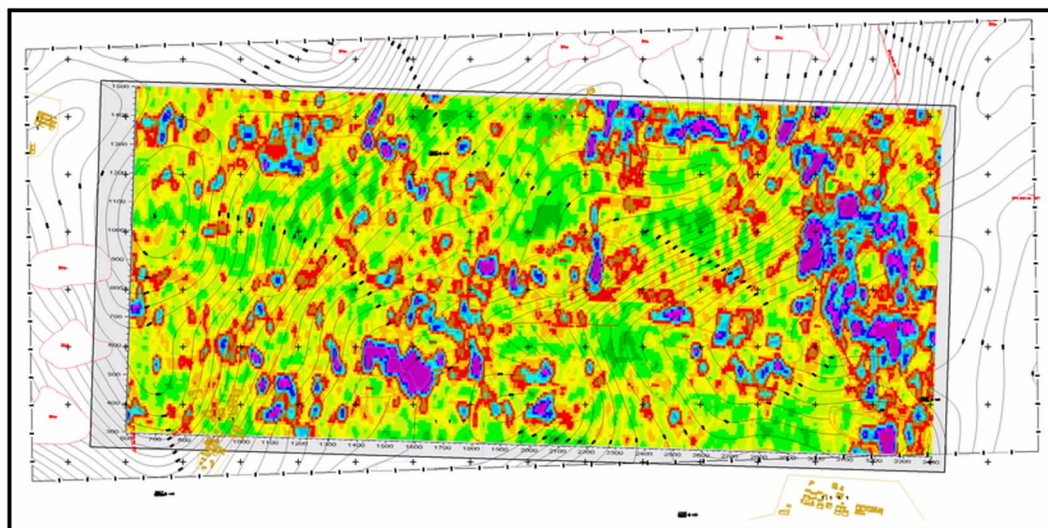


图 12 方位 AVO 反演得到的 3 号煤层各向异性强度平面分布图

Fig. 12 No. 3 coal seam anisotropic stress map from azimuthal AVO inversion

5 结 语

我国煤层气资源丰富,潜力巨大,但煤层气储层地震技术预测研究起步较晚,煤层气属于吸附气,储层厚度薄,地震异常响应弱,勘探难度更大,对地震资料品质及信息量提出了更高要求.受勘探目的及认识影响,目前煤田地震的野外观测系统及原始资料的品质虽然能够满足构造解释的要求,但其信息量和品质与煤层气储层预测要求尚有差距,因此煤层气地震勘探中必须采取相应措施,保证资料信噪比、入射角分布、方位角分布及偏移距分布等参数满足储层研究的要求.本文的研究对煤层气地震采集设计及施工具有现实意义.

参 考 文 献 (References):

[1] 蔚远江,杨起,刘大锰,等.我国煤层气储层研究现状及发展趋势[J].地质科技情报,2001,20(1):56~60.
Wei Y J, Yang Q, Lu D M, *et al.* A review on studies of coal-bed methane reservoirs in China [J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(1): 56~60.

[2] 刘贻军,姜建青.中国煤层气储层特征及开发技术探讨[J].天然气工业,2004,24(1):68~71.
Liu Y J, Lou J Q. Study on reservoir characteristics and development technology of coal-bed gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(1): 68~71.

[3] 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.
He J S, Lü S L. Study on the geophysical characters of coal and gas outburst [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1999.

[4] 姚宇平,周世宁.含瓦斯煤的力学性质 [J].中国矿业大学学报,1988,1:1~7.

Yao Y P, Zhou S N. The mechanical property of coal containing gas [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1988, 1: 1~7.

[5] 王晓曼,彭立世,杨德超.煤的几项力学性质试验研究 [J].焦作矿业学院学报,1991,24(3):46~52.
Wang X M, Peng L S, Yang D C. Experimental research on some mechanical properties of the coal [J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology, 1991, 24(3): 46~52.

[6] 赵群,郝守玲.煤样的超声速度和衰减各向异性测试实例 [J].地球物理学进展,2006,21(2):531~534.
Zhao Q, Hao S L. Anisotropy test instance of ultrasonic velocity and attenuation of coal sample [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 531~534.

[7] 孟召平,张吉昌, Tiedemann J. 煤系岩石物理力学参数与声波速度之间的关系 [J].地球物理学报,2006,49(5):1505~1510.
Meng Z P, Zhang J C, Tiedemann J. Relationship between physical and mechanical parameters and acoustic wave velocity of coal measures rocks [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1505~1510.

[8] 赵秋芳.煤层震波参数测试与研究 [硕士学位论文].合肥:安徽理工大学,2005.
Zhao Q F. Study and test on the coal-wave parameters [D]. Hefei: Anhui University of Science & Technology, 2005.

[9] 梁冰,章梦涛,潘一山,等.瓦斯对煤的力学性质及力学响应的试验研究 [J].岩土工程学报,1995.
Liang B, Zhang M T, Pan Y S, *et al.* The experimental research on the effect of gas on mechanical properties and mechanical response of coal [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 17(5): 12~18.

[10] 冯三利,叶建平.中国煤层气勘探开发技术研究进展 [J].中国煤田地质,2003,15(6):19~23.
Feng S L, Ye J P. Progress in China's CBM exploration and exploitation technical researches [J]. Coal Geology of China, 2003, 15(6): 19~23.

[11] Antonio C. B. Ramos 等著,朱海龙译.在煤层甲烷储层中应

- 用三维 AVO 分析和模拟作裂缝探测[J]. 石油物探译丛, 1998,6:59~72.
- Antonio C. B. Ramos's writing, Zhu Hailong's translations. The application on fracture detection with 3-D AVO technology in CBM reservoir[J]. Overseas Petrogeophysics, 1998,6:59~72.
- [12] 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(增刊 I):131~137.
- Peng S P, Gao Y F. Study on the AVO forward modeling of the coal-bearing strata[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50, S[I]:131~137.
- [13] 刘洋,董敏煜. 各向异性介质中的方位 AVO[J]. 石油地球物理勘探,1999,34(3):260~267.
- Liu Y, Dong M Y. Azimuthal AVO in anisotropic medium[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1999,34(3):260~267.
- [14] 黄伟传,杨长春,王彦飞. 利用叠前地震数据预测裂缝储层的应用研究[J]. 地球物理学进展,2007,22(5):1602~1606.
- Huang W C, Yang C C. The application of Pre-stack seismic data in predicting the fractured reservoir. Progress in Geophysics,2007,22(5):1602~1606.
- [15] 王永刚,朱兆林. 裂缝各向异性介质中 P~SV 转换波正演模拟[J]. 石油物探,2005,44(1):24~28.
- Wang Y G, Zhu Z L. Forward modeling of P-SV wave in fractured anisotropy medium[J]. Geophysical Prospecting For Petrole,2005,44(1):24~28.
- [16] 杨勤勇,赵群,王世星,等. 纵波方位各向异性及其在裂缝检测中的应用[J]. 石油物探,2006,45(2):177~181.
- Yang Q Y, Zhao Q, Wang S X. P-wave azimuthal anisotropy and its application in detection of fractures [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006,45(2):177~181.
- [17] 朱兆林,赵爱国. 裂缝介质的纵波方位 AVO 反演研究[J]. 石油物探,2005,44(5):499~503.
- Zhu Z L, Zhao A G. Azimuthal AVO inversion of P-wave in fractured medium [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005,44(5):499~503.
- [18] 苑书金,于常青. 各向异性介质中的弹性阻抗及其反演[J]. 地球物理学进展,2006,21(2):520~523.
- Yuan S J, Yu C Q. Elastic impedance and seismic inversion in anisotropic media [J]. Progress in Geophysics, 2006,21(2):520~523.
- [19] 孟召平,郭彦省,王赞,等. 基于地震属性的煤层厚度预测模型及其应用[J]. 地球物理学报,2006,49(2):512~517.
- Meng Z P, Guo Y S, Wang Y, *et al.* Prediction models of coal thickness based on seismic attributions and their applications [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(2):512~517.
- [20] 彭晓波,彭苏萍,詹闰,等. P 波方位 AVO 在煤层裂缝探测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2960~2965.
- Peng X B, Peng S P, Zhan Y, *et al.* P-wave azimuthal AVO analysis of fracture detection in coal-bed and its application to engineering [J]. Chinese Journal of rock mechanics and engineering, 2005,24(16):2960~2965.
- [21] 彭苏萍,高云峰,杨瑞召,等. AVO 探测煤层瓦斯富集的理论探讨和初步实践—以淮南煤田为例[J]. 地球物理学报,2005,48(6):1475~1485.
- Peng S P, Gao Y F, Yang R Z, *et al.* Theory and application of AVO for detection of coalbed methane—a case from the Huainan coalfield [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(6):1475~1485.
- [22] 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.
- Zhang A M, Wang Y, Zhao S Z. Study on the AVO model and AVO character of coal seams with different thickness [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997,26(3):36~41.
- [23] David Gray. Seismic Anisotropy in Coal Beds[J]. 2006CSPG-CSEG-CWLS Convention: 519~524.
- [24] 谢桂生,包青山. 横向各向同性介质中弹性波模拟及波场特征研究. 石油地球物理勘探,1996,31(6):806~814.
- Xie G S, Bao J S. Elastic wave simulation and the wave field character study in azimuthal isotropic medium [J]. Oil Geophysical Prospecting,1996,31(6):806~814
- [25] 高云峰. AVO 技术在煤层煤层气富集部位检测中的应用——以淮南煤田为例 [博士学位论文]. 北京:中国矿业大学,2003.
- Gao Y F. The application of AVO technology on the detection of CBM enrichment area—a case from the Huainan coalfield [D]. Bei Jing: China University of Mining & Technology,2003.
- [26] 董守华. 煤弹性各向异性系数测试与 P 波方位各向异性裂缝评价技术 [博士学位论文]. 徐州:中国矿业大学,2004.
- Dong S H. Coal elastic anisotropy coefficient measurement and its crack evaluation technology of P-wave [D]. Xu Zhou: China University of Mining & Technology,2004.
- [27] 赵明金,尚新民,王元庆,等. 三维地震观测系统对 AVO 处理的影响[J]. 物探与化探,2003,27(1):55~58.
- Zhao M J, Shang X M, Wang Y Q. The influence of the 3D seismic observational system upon AVO processing [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2003,27(1):55~58.
- [28] 董守华. 地震资料煤层横向预测与评价方法[M]. 中国矿业大学出版社,2004.
- Dong S H. Lateral prediction and evaluation method with seismic data upon coal seams[M]. China University of Mining & Technology Publishing house, 2004.
- [29] 吴何珍,符力耘,兰晓雯. 基于随机介质模型的储层非均质性分析[J]. 地球物理学进展. 2008,23(3):793~799.
- Wu H Z, Fu L Y, Lan X W. Analysis of reservoir heterogeneity based on random media models[J]. Progress in Geophysics. 2008,23(03):793~799.
- [30] 程冰洁,李小凡,徐天吉. 含流体裂缝介质中地震波场数值模拟[J]. 地球物理学进展. 2007,22(5):1370~1374.
- Cheng B J, Li X F, Xu T J. Numerical modeling of the seismic wave-field in cracked media with liquid[J]. Progress in Geophysics. 2007,22(5):1370~1374.
- [31] 夏红敏,王尚旭,李生杰. 含气地层的 AVO 响应分析——以苏 4 井为例[J]. 石油物探. 2006,45(04):357~361.
- Xia H M, Wang S X, Li S J. AVO analysis on gas-bearing layer[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum. 2006,45(04):357~361.