

杨 春,王 赟,杨德义. 构造煤的地震可识别性特征[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S2): 465-470. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.0359
Yang Chun, Wang Yun, Yang Deyi. Discussion on seismic recognition of deformed coal[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2): 465-470. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.0359

构造煤的地震可识别性特征

杨 春^{1,2}, 王 赟^{3,4}, 杨德义⁵

(1. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 4. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 5. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 为了研究构造煤的地震特征及可识别性, 根据常温常压条件下超声测量所揭示的原生结构煤与构造煤的弹性特征, 建立了 3 种典型的煤层夹构造煤地震地质模型; 利用反射率法计算了这 3 种模型的 PP 波与 PS 波地震响应; 在不同频率下对比分析了构造煤所处位置及厚度大小对煤层反射的影响及其 AVO 特征。结果发现: 构造煤夹层的存在使煤层反射系数增大; 频率越低、构造煤厚度越大, 增加的倍数越高; 相同条件下 PP 波反射系数的增幅高于 PS 波; 在低频情况下, 构造煤在煤层中的空间位置变化在煤层反射的相位上存在异常。从而从理论上证明利用现有的纵波地震反演技术, 理论上可以预测构造煤的存在; PS 波信息的加入有助于提高单纯 PP 波预测的精度, 尤其对构造煤空间位置的确定, PS 波相位具有优于 PP 波的敏感性。

关键词: 构造煤; 地震响应; AVO; 反射系数

中图分类号: P631.4 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2014)S2-0465-06

Discussion on seismic recognition of deformed coal

YANG Chun^{1,2}, WANG Yun^{3,4}, YANG De-yi⁵

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 4. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 5. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To analyze the seismic characters and recognition of deformed coal, according to the ultrasonic elastic characteristics of deformed coals under room temperature and normal pressure, three typical seismic geological models were initially designed. Seismic responses of these three models were simulated with reflectivity method, and their AVO characteristics were analyzed and focused on the influence of the deformed coal's spatial location and thickness on seismic response in different frequencies. The comparisons show that the existence of deformed coal changes the reflection coefficients of coals models, and the amplitudes of reflection coefficients increase. With the lower frequency of the incident waves and the thicker of the deformed coal, the multiple increases significantly. Amplitude's growth rates of PP-wave reflection coefficients are higher than those of PS-wave under the same conditions. Applied jointly with the thickness prediction technology of coal seam, the phase of reflection coefficient can be used to distinguish the relative spatial locations between deformed and un-deformed coals in terms of low frequency. Only using P-wave seismic inversion technique, the deformed coals can be predicted in theory. However, the precision will be improved if PS-wave is considered at the same time, especially for the spatial location prediction of deformed coal.

Key words: deformed coal; seismic response; AVO; reflectance

收稿日期: 2014-03-20 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41374131, #1104084, #1425017)

作者简介: 杨 春(1988—), 女, 江苏徐州人, 博士研究生。E-mail: yangchun@mail.igcas.ac.cn。通讯作者: 王 赟(1969—), 男, 研究员, 博士生导师, 博士。E-mail: yunwang@mail.igcas.ac.cn

我国绝大多数煤田经历过多期次构造运动的作用,构造煤发育较为普遍。随着煤矿开采深度的增加,地应力及瓦斯压力增大、瓦斯含量升高,煤与瓦斯突出灾害日趋严重。国内外大量的研究表明^[1]:发生煤与瓦斯突出的煤层一般都发育有一定厚度的构造煤。构造煤不仅是地质构造运动的标志,也是典型的瓦斯地质体。因此,构造煤的预测是煤矿安全生产及煤层气抽采急需解决的关键问题。

AVO 技术作为烃类、岩性和裂隙的重要检测手段,在石油和天然气研究领域已得到广泛关注。对于煤田 AVO 技术,国内外学者也做了一些研究工作,并取得了一定的成果。1997 年 Ramos 等^[2]在美国圣胡安盆地 Cedar Hill 煤层气田用 AVO 方法检测煤层裂隙,并根据成果布置钻井获得高产,AVO 技术对煤层气的相对富集预测提供了有益的证据。张爱敏等^[3]研究了不同厚度煤层的 AVO 特征,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^[4]对含煤地层振幅随偏移距变化正演模型进行了研究。董守华和岳建华^[5]通过正演模型研究了煤层中纵波反射系数与入射角的关系。陈同俊等^[6]提出一种改进的 Hiltermann 近似方程,将其应用于构造煤 AVO 特征分析及正演模拟;并利用等效介质理论分别对 HTI 及 VTI 假设下的构造煤进行了 AVO 正演^[7-8]。杜文凤等^[9]基于 Zoeppritz 方程对突出煤层和非突出煤层 AVO 响应进行了对比分析,探索了瓦斯突出煤与非突出煤在地震 AVO 特征上的差异,成为地震 AVO 技术预测构造煤的依据之一。

总结当前对于构造煤的反射特征研究,主要基于以下两个思路:一是利用 Zoeppritz 方程及其各种近似公式对构造煤的顶、底界面 AVO 特征进行拟合分析^[4,6,9];二是将构造煤看作各向异性介质对其进行 AVO 正演^[7-8]。前者将构造煤顶、底界面看作单界面进行处理,忽略了层间多次波与波型转换及干涉叠加

的影响,理论上将使得煤层的反演存在较大的误差;后者对于构造煤各向异性的假设缺乏必要的岩石物理实验支撑。

鉴于我国煤层厚度多在 2~10 m,为典型的薄互层,煤层反射表现为顶、底反射及层间多次波叠加形成的复合波^[4],王赞等^[10-13]揭示了构造煤与原生结构煤存在明显的速度差异,笔者定义了 3 个简单的薄互层构造煤,利用薄层反射率法对这 3 种模型的煤层反射进行了讨论,以期对构造煤的地震探测与识别具有一定的帮助。

1 反射率法和地震地质模型

1.1 反射率法

反射率法是地震波场模拟的主要方法之一^[14]。它是在水平层状介质平面波入射假设基础上,通过传播矩阵求出薄互层反、透射系数^[15],考虑了波传播过程中所有可能的波型转换和所有类型的多次波,更接近于实际薄互层的地震响应,比基于 Zoeppritz 方程及其各种近似公式的模拟具有更高的精度。由于薄互层反、透射系数与入射波的频率和层厚有关,而笔者已专门讨论过煤层厚度与频率对煤层反射的影响^[16],因此笔者只是分不同模拟频率讨论煤层厚度一定、不同厚度构造煤夹层对地震响应的影响。对于笔者所设计的以单煤层为目标层位的薄互层模型,为了简化各参数的讨论,在 AVO 分析与讨论中假设煤层的顶、底板岩性不变,且不考虑它们厚度的变化。

1.2 地震地质模型

综合淮南、河南等地 5 个不同矿区的构造煤发育特征^[12],以河南焦作矿区构造煤的空间分布为主要参考,建立如图 1 所示的 3 种典型构造煤薄互层模型。其中图 1(a)表示构造煤夹层位于原生结构煤的中间,图 1(b)代表构造煤夹层位于原生结构煤的顶部,图 1(c)表示构造煤夹层位于原生结构煤的底部。假设模型中的原生结构煤与构造煤均为横向均匀各向同性介质。

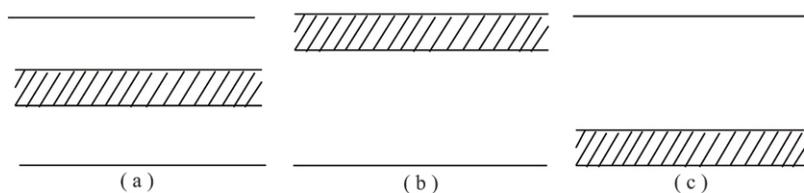


图 1 原生煤与构造煤的薄互层模型

Fig. 1 Thin interbedded models of deformed and undeformed coals

依据焦作无烟煤煤样中原生结构煤和构造煤的超声测量结果^[12]选取弹性参数,设原生结构煤的纵

横波速度比为 2,构造煤纵、横波速度比为 1.8;假设模型的上、下介质为泥岩,模型中各层的弹性参数见

表 1。其中煤层的厚度设定 5 m,构造煤的厚度分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 m。

表 1 模型中各层的弹性参数

Table 1 Elastic parameters of layer models

弹性参数	原生结构煤	构造煤	泥岩
纵波速度 $V_p / (m \cdot s^{-1})$	2 800	1 000	3 500
横波速度 $V_s / (m \cdot s^{-1})$	1 400	556	1 700
密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	1.60	1.60	2.65

在本文的模拟分析中,对原生结构煤及夹有构造

煤的煤层进行反射系数的计算,研究图 1 中不同厚度构造煤的 AVO 响应,并与无构造煤夹层的煤层反射进行对比。

2 模拟结果及分析

对图 1 所示模型进行不同频率(5、25、45、50、65、85 Hz)入射情况下的 PP、PS 波反射系数幅值与相位的计算,图 2~5 分别为其中两个频率(25、50 Hz)入射波在第 1 临界角内的计算结果及其与不含构造煤的煤层反射的对比。

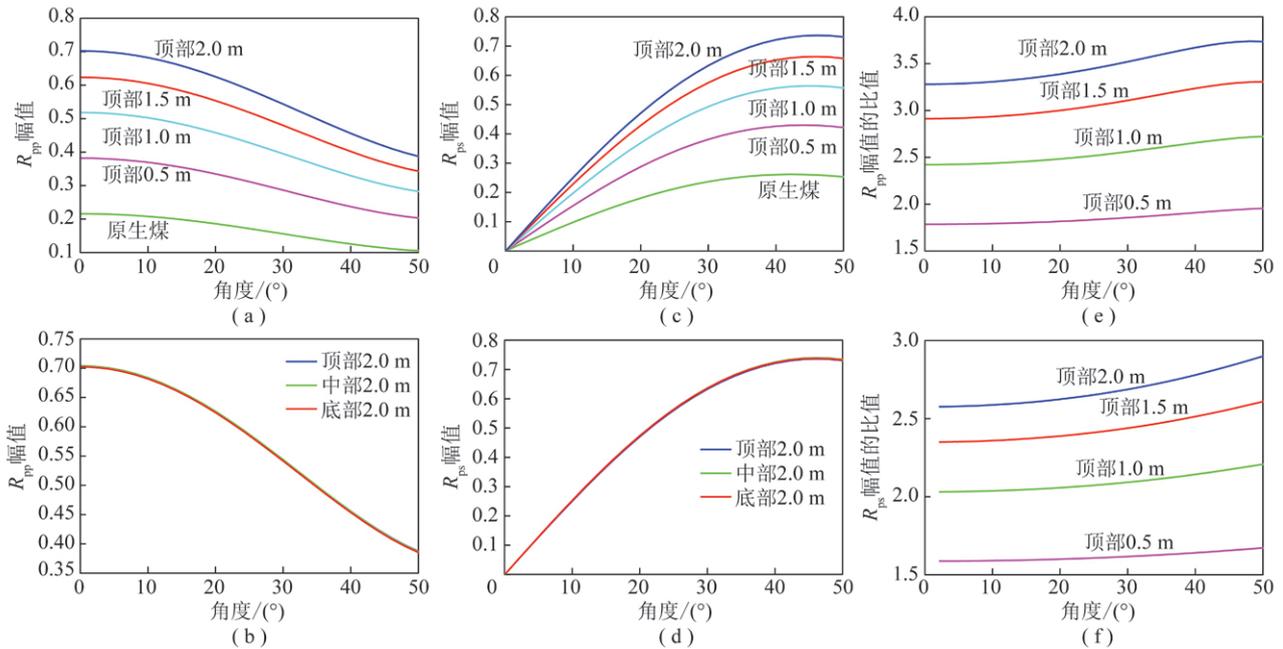


图 2 25 Hz 时 PP 波、PS 波反射系数的幅值及其比值

Fig. 2 Amplitudes and their ratios of the 25 Hz reflected PP-and PS-waves

(a) 构造煤位于顶部情况时 R_{pp} 的幅值; (b) 不同空间位置 2.0 m 厚构造煤 R_{pp} 的幅值; (c) 构造煤位于顶部情况时 R_{ps} 的幅值; (d) 不同空间位置 2.0 m 厚构造煤 R_{ps} 的幅值; (e) 构造煤位于顶部情况时与不含构造煤时 R_{pp} 幅值的比值; (f) 构造煤位于顶部情况时与不含构造煤时 R_{ps} 幅值的比值

从图 2(a)、图 2(c)、图 2(e) 与图 2(f) 对比可以看出: 对于 25 Hz 入射波的情况, 夹有构造煤的煤层比原生结构煤 PP 波、PS 波反射系数都要大; 对于 PP 波反射系数来说, 由 0.5 m 夹层情况下的 1.8 倍左右(相比原生结构煤情况)增加至 2 m 夹层的 3.5 倍左右; PS 波反射系数由 0.5 m 夹层情况下的 1.6 倍左右增加至 2 m 夹层时的 2.6 倍左右; 相同模型条件下, PP 波的反射系数增幅高于 PS 波, 且都随着入射角的增大而增大。

图 2(b) 与图 2(d) 对比可看出: 构造煤厚度不变时, 构造煤所处位置(顶部、底部、中间)对反射系数没影响。从图 2(e) 与图 2(f) 对比可看出: 构造煤所处空间位置不变时, 随着构造煤厚度的降低, PP 波与 PS 波的反射系数均逐渐降低。但是构造煤所处位置

的变化对煤层反射的相位有影响, 如图 3 所示, 夹有构造煤的煤层比原生结构煤 PP 波、PS 波反射系数的相位值要小; 且构造煤厚度不变时, 构造煤位于顶部的煤层模型 PP 波、PS 波反射系数的相位值最大, 位于中间时次之, 处于底部时最小; 当构造煤所处位置不变时, 随着构造煤厚度的降低, 反射系数的相位逐渐升高, 但仍然小于原生结构煤模型的相位。

图 4、5 对比可以看出, 50 Hz 入射波类似于 25 Hz 时的情况: 夹有构造煤的煤层比原生煤 PP 波、PS 波反射系数大, 但相同条件下低于 25 Hz 情况增加的倍数。对于 PP 波反射系数来说, 由 0.5 m 夹层情况下的 1.6 倍左右增加至 2 m 夹层时的 2.3 倍左右; PS 波反射系数由 0.5 m 夹层情况下的 1.4 倍左右增至 2 m 夹层时的 1.9 倍左右。夹层厚度较小

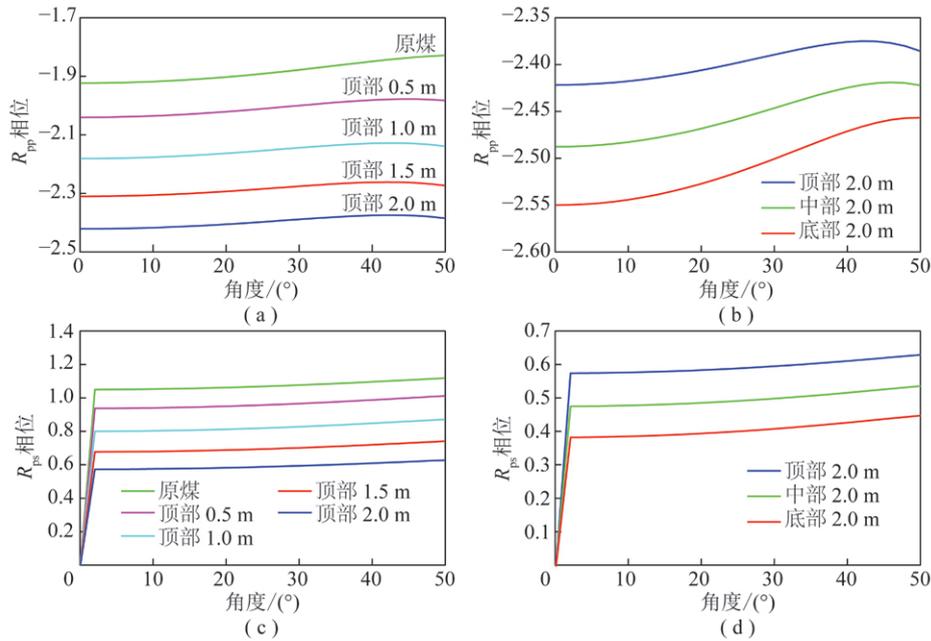


图 3 25 Hz 时 PP 波、PS 波反射系数的相位

Fig. 3 Phases of the 25 Hz reflected PP-and PS-waves

(a) 构造煤位于顶部情况时 R_{pp} 的相位; (b) 不同空间位置 2.0 m 厚构造煤 R_{pp} 的相位;
 (c) 构造煤位于顶部情况时 R_{ps} 的相位; (d) 不同空间位置 2.0 m 厚构造煤 R_{ps} 的相位

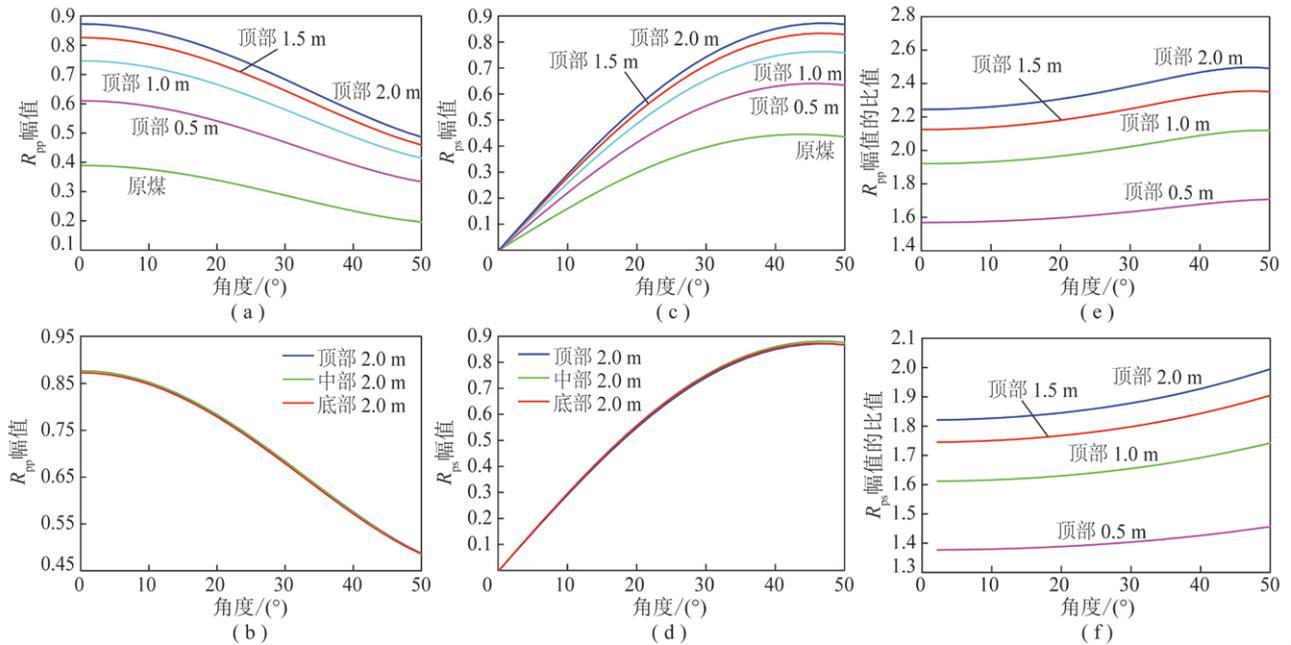


图 4 50 Hz 时 PP 波、PS 波反射系数的幅值及其比值

Fig. 4 Amplitudes and their ratios of the 50 Hz reflected PP-and PS-waves

(a) 构造煤位于顶部情况时 R_{pp} 的幅值; (b) 不同空间位置 2.0 m 厚构造煤 R_{pp} 的幅值; (c) 构造煤位于顶部情况时 R_{ps} 的幅值;
 (d) 不同空间位置 2.0 m 厚构造煤 R_{ps} 的幅值; (e) 构造煤位于顶部情况时与不含构造煤时 R_{pp} 幅值的比值;
 (f) 构造煤位于顶部情况时与不含构造煤时 R_{ps} 幅值的比值

(1.0 0.5 m) 时 构造煤所处位置(顶部、底部、中间)对反射系数稍有影响,中间情况略大于底部情况,且 PS 波反射系数反映较明显;反射系数的相位与 25 Hz 情况反映规律基本相同,但构造煤处于不同位置、取

不同厚度时相位曲线出现相交现象。

不同频率(5 25 45 50 65 85 Hz)分析结果综合对比可以发现:在其他参数相同的情况下,夹有构造煤的煤层 PP 波反射系数随着入射角的增大而减小,

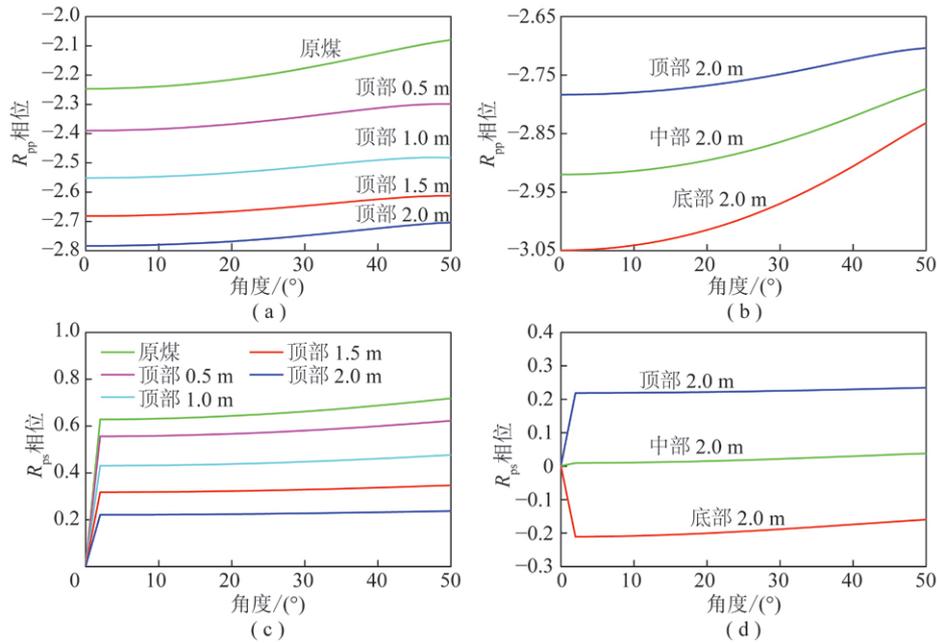


图 5 50 Hz 时 PP 波、PS 波反射系数的相位

Fig. 5 Amplitudes and phases of the 50 Hz reflected P-and S-waves

(a) 构造煤位于顶部情况时 R_{pp} 的相位; (b) 不同空间位置 2.0 m 厚构造煤 R_{pp} 的相位;
 (c) 构造煤位于顶部情况时 R_{ps} 的相位; (d) 不同空间位置 2.0 m 厚构造煤 R_{ps} 的相位。

PS 波反射系数随着入射角的增大而增大,分别与原生结构煤 PP 波、PS 波反射系数随角度变化的规律一致。从量值上分析,夹有构造煤的煤层比原生结构煤反射系数要大,且频率越低、夹层厚度越大反射系数增加的倍数越高;PP 波、PS 波反射系数在 5 Hz, 2 m 夹层情况下分别为原生结构煤的 4.5 倍、4 倍左右,而对于 85 Hz、2 m 夹层情况下仅为原生结构煤的 1.9 倍、1.5 倍左右;相同条件下 PP 波的反射系数增幅高于 PS 波。在构造煤厚度不变时,低频时构造煤所处的位置对反射系数大小基本无影响;但随着频率的增大,构造煤的不同位置在小角度范围内开始呈现差异,PS 波反射系数差异较明显。构造煤的存在造成了地震反射相位的改变,且在低频时可以明显地区分不同位置不同厚度的构造煤;随着频率的增加,构造煤处于不同位置、取不同厚度时相位曲线出现相交现象。由于相位限定在 $[-\pi, \pi]$,故进行高频数值对比讨论时应考虑周期变换。

3 结论与讨论

3.1 结 论

- (1) 构造煤夹层的存在可使煤层反射系数增大,由于反射系数在一定程度上反映反射波的能量,可将煤层的均方根振幅或瞬时振幅出现幅值异常高的位置作为构造煤可能存在的判据之一。
- (2) 在已确定构造煤存在和钻孔与测井约束煤

厚的情况下,低频正演拟合构造煤位于煤层中间的相位变化曲线作为量板,若实际瞬时相位谱曲线值高于量板曲线值,则推测构造煤夹层位于原生结构煤顶部;与之相当,推测构造煤夹层位于原生结构煤中间;小于量板曲线值,则推测构造煤夹层位于原生结构煤底部。

(3) 模拟发现高频时 PS 波较 PP 波反射系数的幅值在小角度范围内对构造煤的位置反映灵敏,在 PP 波反射系数无法准确确定构造煤位置或者存在非唯一性时,可加入 PS 波信息,以提高解释的精度。

3.2 讨 论

为了模拟分析结果对比更明晰,笔者对构造煤模型及煤层等效模型做了一定的简化近似处理,是存在一定问题的。

(1) 对于实际地质情况,构造煤在煤层中的赋存位置是各种各样的,厚度也并非不变,煤层顶底板的岩性和互层的影响是不可忽略的。煤系地层反射系数影响因素很多,如波阻抗、层厚、频率等都可造成煤层反射系数的改变,笔者在以上各因素忽略的情况下,仅考虑了构造煤夹层及厚度变化对反射系数的影响,在实际应用中,需考虑钻孔、测井等信息综合约束。

(2) 波场模拟使用了简单的横向均匀各向同性假设,实际煤层中裂缝、节理、割理、端理发育,不满足各向同性的假设;但鉴于目前的地震勘探水平尚处于各向同性 P 波和弹性波勘探阶段,本文的模拟对于

煤田地震的解释和反演是有指示意义的。虽然煤层为典型的薄层,由于薄层反射的调谐作用,各向异性存在并不会引起十分明显的地震运动学特征的变化,而大多体现在动力学特征的异常上。为了提高对实际介质的近似程度和薄层波场的模拟精度,裂缝等各向异性影响是需要开展研究与讨论的。

(3) 构造煤超声实验结果表明,相比于原生结构煤,构造煤的纵横波速度、品质因子都大幅度降低,笔者仅考虑了纵横波速度的改变,对于品质因子的讨论将在下一步工作中研究。

参考文献:

- [1] 张子敏,张玉贵. 瓦斯地质规律与瓦斯预测[M]. 北京:煤炭工业出版社,2005.
- [2] Antonio CBRamos,Thomas L Davis. 3-D AVO analysis and modeling applied to fracture detection in coalbed methane reservoirs[J]. *Geophysics*,1997,62(6):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.
Zhang Aimin,Wang Yang,Zhao Shizun. AVO character and its modeling research for different thickness coal bed[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*,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.
Peng Supeng,Gao Yunfeng. Study on the AVO forward modeling of the coal bearing strata[J]. *Chinese Science Bulletin*,2005,50(S1):131-137.
- [5] Dong Shouhua,Yue Jianhua. Forward modeling of the relationship between reflection coefficient and incident angle of the P-wave in a coal seam[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*,2006,16(1):5-8.
- [6] 陈同俊,崔若飞,刘恩儒. 构造煤 AVO 特征及正演模拟研究[J]. *地球物理学进展*,2008,23(5):1610-1615.
Chen Tongjun,Cui Ruofei,Liu Enru. AVO forward modeling for VTI coal[J]. *Journal of China Coal Society*,2008,23(5):1610-1615.
- [7] 陈同俊,崔若飞,刘恩儒. VTI 型构造煤 AVO 正演模拟[J]. *煤炭学报*,2009,34(4):439-442.
Chen Tongjun,Cui Ruofei,Liu Enru. AVO forward modeling for VTI coal[J]. *Journal of China Coal Society*,2009,34(4):439-442.
- [8] 陈同俊,王新,崔若飞. 基于方位 AVO 正演的 HTI 构造煤裂隙可探测性分析[J]. *煤炭学报*,2010,35(4):640-644.
Chen Tongjun,Wang Xin,Cui Ruofei. The detectability on HTI tectonic coal cracks by azimuthal AVO's forward modeling[J]. *Journal of China Coal Society*,2010,35(4):640-644.
- [9] 杜文凤,彭苏萍,王珂,等. 瓦斯突出煤和非突出煤 AVO 响应的比较[J]. *中国煤炭地质*,2010,22(6):45-48,58.
Du Wenfeng,Peng Supeng,Wang Ke,et al. AVO response comparison between gas outburst coal and non-outburst coal[J]. *Coal Geology of China*,2010,22(6):45-48,58.
- [10] 王赞,许小凯,张玉贵. 六种不同变质程度煤的纵横波速度特征及其与密度的关系[J]. *地球物理学报*,2012,55(11):3754-3761.
Wang Yun,Xu Xiaokai,Zhang Yugui. Characteristics of P-wave and S-wave velocities and their relationships with density of six metamorphic kinds of coals[J]. *Chinese J. Geophys.*,2012,55(11):3754-3761.
- [11] 王赞,张玉贵,许小凯. 六种不同变质程度煤的最大镜质组反射率与弹性参数的关系[J]. *地球物理学报*,2013,56(6):2116-2122.
Wang Yun,Zhang Yugui,Xu Xiaokai. Relationship between the maximum vitrinite reflectance and the elastic parameters of coal: A lab ultrasonic measurement of 6 metamorphic kinds of coals[J]. *Chinese J. Geophys.*,2013,56(6):2116-2122.
- [12] 王赞,许小凯,杨德义. 常温条件下五种变质程度构造煤的超声弹性特征[J]. *中国科学:地球科学*,2014,44(11):2431-2439.
Wang Yun,Xu Xiaokai,Yang Deyi. 2014. Ultrasonic elastic characteristics of five kinds of metamorphic deformed coals under room temperature and pressure conditions[J]. *Science China: Earth Sciences*,2014,57:2208-2216,doi:10.1007/s11430-014-4922-4.
- [13] 许小凯,王赞,孟召平. 六种不同煤阶的品质因子特征[J]. *地球物理学报*,2014,57(2):644-650.
Xu Xiaokai,Wang Yun,Meng Zhaoping. Quality factor characteristics of six metamorphic kinds of coals[J]. *Chinese J. Geophys.*,2014,57(2):644-650.
- [14] Fuchs K,Müller G. Computation of synthetic seismograms with the reflectivity method and comparison with observations[J]. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*,1971,23(4):417-433.
- [15] 汪恩华,贺振华,李庆忠. 基于薄层的反射系数谱理论与模型正演[J]. *成都理工学院学报*,2001,28(1):70-74.
Wang Enhua,He Zhenhua,Li Qingzhong. Reflectance spectrum theory and model computation based on thin beds[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*,2001,28(1):70-74.
- [16] 杨春,王赞,芦俊. 关于薄层与单界面模型弹性反透射系数的讨论[A]. *中国地球物理学会第二十七届年会论文集[C]*,2011.