文章编号:0253-9993(2013)10-1715-05

HTI 煤层 AVO 响应特征及其影响因素

彭苏萍¹ 汪宏伟¹² 杜文凤¹ 闪精为¹

(1. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083; 2. 吉林大学 地球探测科学与技术学院,吉林 长春 130026)

摘 要:针对两地层均为 HTI 介质的界面,根据位移理论,推导出地震纵波、横波分别从界面上方 和下方入射情况下的反射纵波、反射横波、透射纵波和透射横波等发散系数精确表达式。推导公式 可以解决地层物性差异大和大偏移距造成系数不够准确的问题。利用所推导的公式,得到 HTI 煤 层 AVO 的发散系数曲线。通过分析发现,HTI 煤层 AVO 响应特征,除了受背景介质物性参数影响 外,还与裂隙密度、裂隙开度和裂隙填充物有关。在裂隙填充物为流体时,裂隙密度是影响 AVO 的 最主要因素。

关键词: HTI 介质; 煤层; AVO; 发散系数

中图分类号: P631.3 文献标志码: A

AVO response characteristics and its influencing factors in HTI coalbed

PENG Su-ping¹ ,WANG Hong-wei^{1 2} ,DU Wen-feng¹ ,GOU Jing-wei¹

(1. State Key Laboratory of Coal Resource and Safe Mining China University of Mining and Technology (Beijing) Beijing 100083 China; 2. College of Geo-Exploration Science and Technology Jilin University Changchun 130026 China)

Abstract: According to the displacement theory authors derived the exact scattering coefficients of reflected P wave, reflected S wave transverse P wave and transverse S wave when P and S waves travel up and down through the boundary between the two HTI media. This expression can solve the problem of the inaccurate coefficient caused by the formation with great physical differences and the large offset. Through the derived formula ,drew the AVO scattering curves of HTI coalbed. Crack density aspect aperture and crack filling have effects on AVO response characteristics of HTI coalbed in addition to the physical parameters of the background medium. When the crack filling is fluid ,crack density is the most important factor.

Key words: HTI media; coalbed; AVO; scattering coefficient

瓦斯突出和灰岩裂隙导水是影响煤矿安全生产 的重大隐患,已有研究表明,地震勘探 AVO 技术是探 测瓦斯富集区^[1]和灰岩裂隙带的有效手段。有关煤 层 AVO 技术,专家学者开展了相关的研究,Ramos 等 在美国锡达山煤层气田用 AVO 方法研究了煤层裂隙 检测方法^[2] 涨爱敏等研究了不同厚度煤层的 AVO 特征^[3] 邓小娟等针对薄煤层顶底板之间存在强反 差的特点,对各向异性薄煤层 AVO 转换波进行了研 究^[4-5] Shuey 和 Aki 等给出了上下介质差异不大的 弱各向异性纵波反射系数公式^[6-9],阎贫和张中杰等 研究了各向异性介质速度和传播方向的关系^[10-11], Steve Kelly 等对垂直裂隙影响下产生的转换波进行 研究^[12],赵邦六总结了转换波反射系数求取方法^[13],刘洋等做了方位 AVO 研究^[14],Hudson^[15]、 Cheng 和 Stuart Crampin 研究了等效裂隙模型^[16-18]。 对前人在 AVO 公式推导方面的研究成果进行分析, 不难发现,很多专家针对 AVO 纵波入射下的纵波反 射系数近似公式投入大量精力,而只有部分学者给出 AVO 转换波系数公式近似解,对纵波入射下的横波 反射系数的精确解,研究就更少,所给出的表达式也 比较笼统。笔者基于刘洋方位 AVO^[14] 思路,推导 AVO 的反射纵波系数、反射横波系数、透射纵波系数 和透射横波系数(统称为发散系数)表达式和分析 AVO 特征曲线的影响因素。以两层 HTI 介质为模

收稿日期: 2012-12-31 责任编辑: 韩晋平

基金项目:国家科技支撑计划课题资助项目(2012BAB13B01_2012BAC10B03);国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB226800) 作者简介:彭苏萍(1959—),男 江西萍乡人,中国工程院院士,教授,博士生导师。E-mail:psp@cumtb.edu.cn

型 结合 Cheng(1993) 理论 Hooke 系数矩阵算法,利 用位移公式推导出 HTI 介质发散系数精确表达式。 在此基础上,分别改变 HTI 煤层的裂隙填充物、裂隙 密度和裂隙开度,讨论这些因素对 AVO 曲线的影响。

1 AVO 正演理论

研究界面发散波 AVO 曲线特征,设定上下介质 均为 HTI 介质(图1),裂隙走向垂直于对称轴 X_{\circ} 第 1 层介质中纵波速度、横波速度和密度分别为 v_{p1} p_{s1} , ρ_1 **D** 表示 HTI 的 Hooke 矩阵元素 ε_1 代表裂隙密度, (d/a)₁ 为裂隙开度, K_1^* 表示填充物体积模量,其中 速度是传播方向的函数。介质 2 参数含义同介质 1。

纵波、横波分别从界面上方和下方入射,来求取 发散系数。设定上层介质入射纵波 d P_1 、横波 d S_1 分 别以 $\alpha_1 \beta_1$ 入射,下层介质纵波 u P_2 、横波 u S_2 分别以 $\alpha_4 \beta_4$ 入射 $\mu P_1 \mu S_1 dP_2 dS_2$ 为界面处发散波。 α_i , β_i 代表纵波和横波传播角度 $\theta_i \gamma_i$ 代表纵波和横波 偏振角度。

二维位移通项公式为 $u = (f h) e^{iu(px+qz-t)}$,其中 f, h 代表位移在 X Z 方向的分量; p q 代表纵横波在 X Z Z 方向上的慢度; w 为频率。根据界面位移和应力连 续条件,经过推导最终得到纵波(dP_1 , uP_2)、横波



上下介质为均匀介质时 将 $\alpha_i = \theta_i \beta_i = \gamma_i (i = 1 \sim 4)$ 代入式(1) 则化简为著名的 Zoeppritz 方程。

利用 bond 变换^[19],对式(1) 中的 Hooke 系数矩阵 **D** 进行推导,可以进一步导出 VTI 和 TTI 介质的 AVO 表达式,在此基础上,就可以进行 VTI 和 TTI 介 质模型的 AVO 正演。

2 HTI 介质 AVO 特征研究

针对煤层顶板为砂岩的情况,以纵波从上地层入 射为例,设计两种类型地质模型:一类是上层介质为 砂岩1、下层介质为 HTI 构造煤;另一类上层介质为 砂岩2、下层为 HTI 构造煤。根据文献[20-21],设 计物性参数见表1。利用式(1),计算获得了两种类



图1 纵波、横波从界面入射形成发散波

Fig. 1 P-wave and S-wave formation of scattered wave incident from the upper and lower interfaces

$(dS_1 \mu S_2)$ 分别入射的发散系数表达式为

$$\boldsymbol{M} \begin{bmatrix} R_{p1p1} & R_{s1p1} & T_{p2p1} & T_{s2p1} \\ R_{p1s1} & R_{s1s1} & T_{p2s1} & T_{s2s1} \\ T_{p1p2} & T_{s1p2} & R_{p2p2} & R_{s2p2} \\ T_{p1s2} & T_{s1s2} & R_{p2s2} & R_{s2s2} \end{bmatrix} = \boldsymbol{N}$$
(1)

式中 *R*_{stp1} 为 S₁ 入射反射波为 P₁ 反射系数; *T*_{stp2} 为 S₁ 入射透射波为 P₂ 透射系数 ,其他系数类推; *M*, *N* 中的 *D* 是根据 Cheng(1993) 理论来求取。

•	$-\sin\theta_3$	- cos γ ₃]
	$-\cos \theta_3$	$\sin \gamma_3$
	$-\frac{D_{55}^2 \sin(\theta_3 + \alpha_3)}{v_{p2}(\alpha_3)}$	$-\frac{D_{55}^2 \cos(\gamma_3 + \beta_3)}{v_{s2}(\beta_3)}$
-	$-\frac{D_{13}^2 {\sin \theta_3} {\sin \alpha_3} + D_{33}^2 {\cos \theta_3} {\cos \alpha_3}}{v_{\rm p2}(\alpha_3)}$	$\frac{-D_{13}^2 \cos \gamma_3 \sin \beta_3 + D_{33}^2 \sin \gamma_3 \cos \beta_3}{v_{s2}(\beta_3)} \right]$
	$\sin \theta_4$	$-\cos \gamma_4$
	$-\cos \theta_4$	$-\sin \gamma_4$
	$-\frac{D_{55}^2 \sin(\theta_4 + \alpha_4)}{v_{\rm p2}(\alpha_4)}$	$\frac{D_{55}^2 \text{cos}(\gamma_4 + \beta_4)}{v_{s2}(\beta_4)}$
β1	$\frac{D_{13}^2 \sin \theta_4 \sin \alpha_4 + D_{33}^2 \cos \theta_4 \cos \alpha_4}{v_{-2}(\alpha_4)}$	$\frac{-D_{13}^2\cos\gamma_4\sin\beta_4+D_{33}^2\sin\gamma_4\cos\beta_4}{v_2(\beta_4)}$

型的 AVO 曲线 如图 2 所示。

当纵波从上层各向同性砂岩层入射到 HTI 构造 煤时,得到如图 2(a)所示的散射系数曲线,反射纵波 系数在入射角为 0 ~ 70°增大,70°~90°减小;反射转 换波能量从 0 开始增大,到 40°达到极大值,然后再 逐渐减小到 0;透射纵波系数随着角度增加减小,在 90°为 0;透射横波系数随着角度增加变大,在 60°附 近达到最大值,随后迅速减小,在 90°时为 0。

当纵波从上层 HTI 砂岩层入射到 HTI 构造煤 时 散射系数曲线如图 2(b) 所示。与图 2(a) 相比, 其散射系数变化趋势基本相同,不同点在于 R_{p1p1} 和 T_{p1p2} 变化相对平缓,幅值波动范围相对较小,极值向 大入射角移动,而 R_{p1s1} 和 T_{p1s2} 幅值变化大,在中、远 表1 单界面煤层各向异性介质物性参数

Table 1 Anisotropic coalbed physical parameters of single interface										
	岩性	各向同性参数		各向异性参数						
介质结构		$v_{\rm p} / ({\rm ~m} \cdot {\rm s}^{-1})$	$v_{\rm s} / ({\rm m} \cdot {\rm s}^{-1})$	裂隙密度	裂隙开度	裂隙填充物的体 积模量/MPa	- 密度ρ/ (g•cm ⁻³)			
上层介质顶板	砂岩1	4 353	2 713				2.61			
上层介质顶板	砂岩2	4 353	2 713	0.1	0.01	8	2.61			
下层介质煤层	HTI 构造煤	1 891	937	0. 25	0.02	10	1.36			



图2 介质界面处反射及透射系数曲线

Fig. 2 Reflection and transmission coefficients in medium interface

偏移距位置,反射横波能量超过纵波,理论上说明在 裂隙发育地带利用转换波勘探是优于纵波勘探的。

以上层介质为砂岩 1、下层为 HTI 构造煤,纵波 从砂岩 1 入射到构造煤为例,根据文献 [22]中 Andreas Ruger 给出的 strike 面内反射纵波近似公式与 式(1)中推导的 *R*_{plp1} 做对比,如图 3 所示,克服了物 性差异和大偏移距困难,保证了 AVO 计算准确性。





Fig. 3 Deduced formula in contrast with Ruger approximate formula

3 煤层 HTI 各向异性介质 AVO 曲线的影响 因素

根据式(1)可以发现,煤层 HTI 各向异性介质 AVO 曲线除了受背景介质物性参数影响外,还与裂 隙密度、裂隙开度和裂隙填充物有关。笔者研究的重 点是构造煤,在高裂隙密度区域容易出现流体的富集 区(主要是指煤层气、水),再通过裂隙开度可以初步 判断流体是吸附状态还是游离状态,通过裂隙填充物 判断填充物物性。以砂岩1与HTI构造煤界面为模型 纵波从砂岩1入射,分别讨论上述3个因素对 AVO曲线的影响。

3.1 裂隙密度对 AVO 曲线的影响

当煤层裂隙开度为 0.02,体积模量为 10 MPa 时 根据文献 [17]中 Stuart Crampin 给出若裂隙密度 过大时,首先深煤层骨架孔隙会被压缩以致破碎,其 次不连通孔隙会连通等,会影响介质弹性参数,大裂 隙密度一般出现在煤层破碎带,故将裂隙密度分别设 为 0.05 0.10 0.15 和 0.20,得到不同裂隙密度下纵 波和横波反射系数曲线(图4)。从图4 可以看出,不 同裂隙密度的纵波反射系数曲线总体趋势是先增加 再减小,而转换波反射系数曲线是先减小后增加;大 约在 30°角以下的范围内,裂隙密度小的纵波反射系 数曲线数值大,大约在 30°~80°,裂隙密度大的反射 系数大,在接近 90°的时候曲线重合,而反射横波曲 线在 0°和 90°附近是重合的。

3.2 裂隙填充物对 AVO 曲线的影响

当煤层裂隙密度为 0. 10,裂隙开度为 0. 02 时, 将裂隙填充物分别设为天然气(0.04 GPa)和水 (2.6 GPa)^[21],研究不同裂隙填充物对 AVO 曲线的 影响(图 5)。从图 5 可以看出裂隙填充物对纵波反 射系数的影响比对转换横波反射系数的影响大。不 同体积模量纵波反射系数从总体上看变化趋势是先 增加再减小,而转换横波反射系数是先减小再增加; 随着裂隙填充物体积模量的增大,纵波反射系数曲

报



with different crack filling

线、横波反射系数曲线数值增大;纵波反射系数在 90°附近 不同体积模量的曲线是重合的 而横波反射 系数在 0° 和 90° 附近不同体积模量的曲线是重合的; 转换横波反射系数极值比反射纵波出现的早。

3.3 裂隙开度对 AVO 曲线的影响

当煤层裂隙密度为 0.10 ,体积模量为 10 MPa ,设 裂隙开度分别取 0.001 0.01 0.1 和 1。在砂岩 1 和 构造煤界面处,以纵波从砂岩1入射,研究不同裂隙

开度对 AVO 曲线影响。图 6 表示裂隙开度对 AVO 曲线影响 ,不同裂隙开度的 AVO 曲线变化趋势裂隙 填充物基本一样 不同点在于裂隙开度增大 纵波反 射系数和转换横波反射系数都在减小。如将体积模 量设为0.即为真空条件下,裂隙开度对AVO曲线没 有影响(图7),裂隙开度不会对曲线产生影响,这个 结论与 Cheng(1993) 公式得出的结论一致^[16]。



不同裂隙开度对 HTI 介质反射系数曲线的影响

Reflection coefficient of HTI medium with different fracture aperture



真空状态下不同裂隙开度对 AVO 曲线的影响 图 7

Fig. 7 Effect of different fracture aperture on AVO

curves without crack filling

综上所述 除了背景介质外 对 AVO 曲线影响最

大的因素是裂隙密度,裂隙填充物体积模量越小,可 以忽略裂隙填充物和裂隙开度的影响。

4 结 论

(1) 针对 HTI 介质 根据界面位移和应力连续条件 推导出上下介质均为各向异性的纵波、横波分别 从顶板和煤层入射下的发散系数表达式。若介质为 均匀介质,该表达式可简化为 Zoeppritz 方程。

(2) 利用 bond 变换,对所推导出的 HTI 介质 AVO 表达式中的 Hooke 系数矩阵 D 进行变换,可以 进一步导出 VTI 和 TTI 介质的 AVO 表达式,在此基 础上,就可以进行 VTI 和 TTI 介质模型的 AVO 正演。

(3)利用推导出的式(1),对 HTI 煤层进行了 AVO 正演模拟,得到反射纵波和反射横波发散系数 曲线。分析发现,HTI 煤层 AVO 曲线除了受背景介 质物性参数影响外,还与裂隙密度、裂隙开度和裂隙 填充物有关。在裂隙填充物体积模量小时,除骨架 外,裂隙密度是最主要的因素。

需要指出的是,笔者针对两层介质进行的 AVO 表达式及其曲线特征的研究,只考虑了弹性介质,没 有涉及黏弹性介质。对于多层介质以及黏弹性介质 情况,有待于进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 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):1-7.
 Peng Suping ,Gao Yunfeng. Study on the amplitude versus offset forward modeling of coal bearing strata [J]. Chinese Science Bulletin, 2005 50(S1):1-7.
- [2] Ramos A C B ,Davis T L. 3_D AVO analysis and modeling applied to fracture detection in coalbed methane reservoirs [J]. Geophysics , 1997 62(2):1683-1695.
- [3] 张爰敏,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 coalbed [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1997 26(3):36-41.
- [4] 邓小娟 彭苏萍 林庆西,等. 基于各向异性的薄煤层 AVO 正演 方法[J]. 煤炭学报 2010 35(12): 2053-2058.
 Deng Xiaojuan Peng Suping Lin Qingxi et al. AVO forward method of anisotropic thin coalbed[J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(12): 2053-2058.
- [5] 邓小娟,彭苏萍 杜文凤,等.薄煤层 P-SV 转换波 AVO 正演研究[J].煤炭学报 2012 37(1):62-66. Deng Xiaojuan ,Peng Suping ,Du Wenfeng ,et al. Converted wave AVO forward method of P-SV thin coal bed [J]. Journal of China

Coal Society 2012 37(1):62-66.
[6] Shuey R T A. Simplification of the Zeoppritz equations [J]. Geophysics ,1985 50:609-614.

- [7] Aki K ,Richards P G. Quantitative seismology: theory and methods[J]. San Francisco: W H Freeman & Co. ,1980.
- [8] Bortfeld R. Approximation to the reflection and transmission coefficients of plane longitudinal and transverse waves [J]. Geophysical Prospecting ,1961(9):485-502.
- [9] 郑晓东. Zoeppritz 方程的近似及其应用[J]. 石油地球物理勘 探,1991 26(2):129-144.
 Zheng Xiaodong. Approximation of Zoeppritz equation and its applicaton [J]. Oil Geophysical Prospecting,1991 26(2):129-144.
- [10] 阎 贫 涨中杰 何樵登. 二维 TIM 中的传播矩阵与面波相速度[J]. 物探化探计算技术 ,1996 ,18(2):108-112. Yan Pin Zhang Zhongjie ,He Qiaodeng. Propagating matrix and analytical solutions to the phase velocity of surface waves in 2-D transversely isotropic media [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration ,1996 ,18(2):108-112.
- [11] 张中杰 何樵登. 含裂隙介质中地震波运动学问题的正演模拟
 [J]. 石油地球物理勘探 ,1989 24(3): 290-300.
 Zhang Zhongjie He Qiaodeng. Forward modeling of kinematic problems of seismic wave in fractured medium [J]. Oil Geophysical Prospecting ,1989 24(3): 290-300.
- [12] Steve Kelly ,Paul Baltensperger ,George A McMechan. P-to-S conversion for a thin anisotropic zone produced by vertical fracturing [J]. Geophysical Prospecting ,1997 45:551-570.
- [13] 赵邦六.多分量地震勘探技术理论与实践[M].北京:石油工业 出版社 2007:24-85.
- [14] 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): 260-268.

Liu Yang ,Dong Minyu. Azimuthal AVO in anisotropic medium [J]. Oil Geophysical Prospecting ,1999 ,34(3) : 260–268.

- [15] 魏修成. 含裂隙地层各向异性研究 [D]. 东营: 中国石油大学, 1992.
- [16] Cheng C H. Crack models for a transversely anisotropic medium [J]. Geophysics 1993 98:675-684.
- [17] Stuart Crampin. Comment on "Crack models for a transversely isotropic medium" by C. H. Cheng and comment by C. M. Sayers [J]. Journal of Geophysical Research ,1994 99: 11749-11751.
- [18] Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic medial [J]. Wave Motion ,1981(3): 343-391.
- [19] 吴国桢. 各向异性介质地震波传播与成像[M]. 东营: 中国石油 大学出版社 2006:43-70.
- [20] 彭苏萍 高云峰 彭晓波 等. 淮南煤田含煤地层岩石物性参数 研究[J]. 煤炭学报 2004 29(2):177-181.
 Peng Suping , Cao Yunfeng , Peng Xiaobo , et al. Study on the rock physic parameters of coal bearing strata in Huainan coalfield [J].
 Journal of China Coal Society 2004 29(2):177-181.
- [21] 刘国强,谭廷栋. 岩性和孔隙流体性质的弹性模量识别方法
 [J]. 石油物探,1993,32(2):88-95.
 Liu Guoqiang, Tan Tingdong. Identifying lithological characteristics and the type of pore fluid in line of elastic module [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1993, 32(2):88-95.
- [22] Andreas Riiger. Reflection coefficients and azimuthal AVO analysis in anisotropic media [M]. USA: Society of Exploration Geophysicists 2010:63-82.