

文章编号: 0253-9993(2012)01-0062-05

薄煤层 P-SV 转换波 AVO 正演研究

邓小娟 彭苏萍 杜文凤 勾精为 庆怀韬

(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)

摘 要: 研究了 EDA(Extensive Dilatancy Anisotropy) 介质中的横波分裂现象,在此基础上,对薄煤层的转换波反射系数进行了推导,并建立了含煤地层模型,并对该模型进行了 P-SV 转换波 AVO 正演模拟。模拟结果分析发现:入射角为 0 时,薄层的转换波反射系数为 0;随着入射角的增大,反射系数先增大到一个最大值,然后开始减小,薄层的厚度对于薄煤层的转换波反射系数存在较大的影响,裂隙密度和裂隙的填充物对于薄层的转换波反射系数在大角度入射时存在较大影响,这种影响与 EDA 介质的各向同性背景参数有较大关系,裂隙的开度对于薄层转换波反射系数几乎没有影响。

关键词: 薄煤层; AVO; 转换波; EDA 介质

中图分类号: P631.4 **文献标志码:** A

Converted wave AVO forward method of P-SV thin coal bed

DENG Xiao-juan, PENG Su-ping, DU Wen-feng, GOU Jing-wei, QING Huai-tao

(State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Researched on the S-wave splitting phenomenon in the EDA medium, and based on it, deduced the converted wave reflection coefficient, built and did the P-SV converted wave AVO forward modeling on the coal measure strata model. The results show that when the incidence angle is 0, the thin layers' converted wave reflection coefficient is 0. As the incidence angle grows, it increases to a maximum value at first and then begins to decrease. The thickness of the thin layers has a great effect on it in the thin coal beds, and so are the fracture density and the filler of fracture when it is the large angle incidence. This influence has much to do with the background parameter of the isotropic of the EAD medium. The fracture's opening hardly affects the converted wave reflection coefficient of the thin beds.

Key words: thin coal bed; AVO; converted wave; EDA medium

随着 AVO 技术的不断发展以及三维三分量地震勘探技术的应用,目前 P-SV 转换波勘探已经成为国内外主要的横波勘探手段。P-SV 转换波勘探的理论基础是 Zoeppritz 方程,但是该方程非常复杂,无法直接用于 AVO 分析,为了充分利用 P-SV 转换波 AVO 信息来获取更为可靠的储层物性特征参数,许多学者分别从不同角度对 P-SV 波反射系数公式进行了简化,给出了不同形式的近似公式^[1-7]。

近年来, P-SV 转换波地震勘探方法在煤田勘探中得到了迅速发展。在利用转换波研究煤层裂隙方面,勾精为等^[8]对用转换波检测煤层裂隙的方法进

行了探讨,王赞等^[9]利用转换波对煤系地层裂缝裂隙发育带进行了预测,何兵寿等^[10]研究了煤体中直立裂隙的多波地震响应;在煤层转换波数值模拟方面,甘文权等^[11]对含裂隙介质中的横波分裂现象进行了数值模拟,王磊等^[12]对煤层转换波进行了数值模拟,杨德义等^[13]对含裂隙煤层的地震记录进行了模拟。

对上述研究和应用进行分析后发现,由于煤层本身的特殊性质(波速低、密度小、层厚薄、裂隙密度大)^[8],将各 P-SV 转换波反射系数近似公式应用于煤层 AVO 转换波正演模拟,会存在如下问题^[14]:

(1) 各 P-SV 转换波反射系数近似公式表示两个半空间无限各向同性弹性介质分界面上产生的反射和透射波的情况,但是,通常煤层的厚度多在 $2 \sim 10 \text{ m}^{[15]}$ 并且煤层中广泛存在彼此平行的定向裂隙,很难满足上述假设条件。

(2) P-SV 转换波反射系数近似公式是用来表达波在弹性分界面上的反射和透射情况的,所以它们只能反映层间界面上的信息,不能反映层内的属性,尤其是薄煤层的属性。

(3) P-SV 转换波反射系数近似公式是在基于反射界面两侧介质的波阻抗差较小的假设条件下得到的,而煤层与其顶底板砂岩或灰岩之间存在很大的波阻抗差,不能满足反射界面两侧介质波阻抗差较小的条件。

沉积型地层中各向异性主要有 PTL 各向异性和 EDA 各向异性两种,其中 PTL 各向异性由周期性薄层引起,EDA 各向异性由相互平行被流体充填的孔隙、裂隙、微裂缝和定向排列的微孔洞引起^[16]。煤层中广泛存在定向的彼此平行的裂隙,因此,为了适应煤系地层的实际情况,将煤层看作 EDA (Extensive Dilatancy Anisotropy) 等效介质。

由于将 P-SV 转换波反射系数近似公式应用于煤层 AVO 正演模拟存在上述缺陷。文中对 EDA 介质中速度进行研究,在此基础上设计煤系地层 AVO 模型,并利用邓小娟等^[17]推导的薄煤层转换波 AVO 计算公式对该模型进行了正演模拟,合理设置各项参数,得到薄煤层的转换波反射系数曲线,并对其进行分析。

1 煤层中地震波速度的分析

煤层中广泛存在定向的彼此平行的裂隙,因此一般将煤层看作 EDA 等效介质。地震波在 EDA 介质中传播的速度有两种:相速度和群速度。相速度是平面波的波峰(或波谷)传播的速度,其值定义为主频与波数的比值^[18],可以通过 Christoffel 方程求得;而群速度就是射线速度,即波能量传播的速度^[18],群速度不仅是相速度的函数,而且依赖于偏振方向,在频散关系中以隐函数形式出现,因此计算比较复杂^[19],文中 EDA 介质的群速度计算根据何樵登等^[20]推导的裂隙介质中弹性波群速度计算公式计算。

在各向同性介质中,相速度不随传播方向而变化,群速度和相速度一致,相速度面和群速度面重合^[19],而在 EDA 介质中,相速度和群速度发生明显分离,且速度表现出角散特性,相速度和群速度在幅度和方向上都不同,在 EDA 介质中任意点,其波前面

上的群速度要大于相速度^[18],文中用射线追踪方法求取 EDA 薄层的转换波反射系数,由于群速度计算比较复杂,因此计算中选用相速度。

另外,当横波通过 EDA 介质时,由于各向异性的存在,不同极化横波的传播速度不同,因此造成了横波的分裂(shear wave splitting),又称为横波双折射(birefringence 或 double refraction),出现了快横波和慢横波,偏振近于平行于裂隙方向的波为快横波,偏振近于垂直于裂隙方向的波为慢横波^[19],快横波和慢横波沿着完全相同的路径传播^[21]。

2 薄煤层转换波反射系数的求取

薄煤层地质模型可以看作是 EDA 薄层位于两个各向同性介质之间的模型,设 EDA 的各向异性对称轴与 x 坐标重合,如果只有纵波入射,则散射波有 4 种:反射纵波、反射转换横波、透射纵波、透射转换横波(图 1),此时边界条件只涉及到 x 方向位移、 z 方向位移、应力的法向分量和 xz 切向分量。

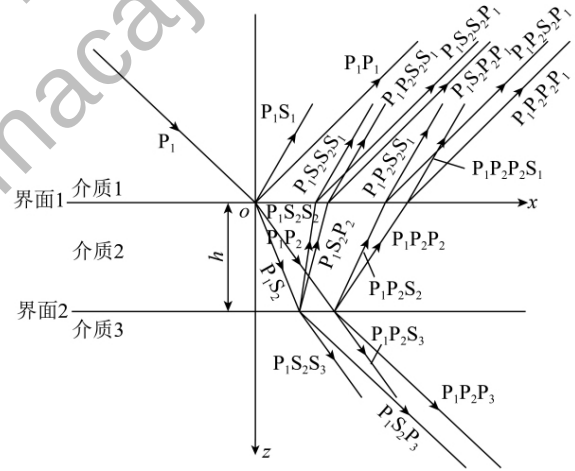


图 1 3 层介质模型

Fig. 1 Three-layer medium models

如图 1 所示,纵波 P_1 入射到界面 1 经过 1 次反射后介质 1 内存在纵波反射 P_1P_1 、 $P_1S_2S_2P_1$ 、 $P_1S_2P_2P_1$ 、 $P_1P_2S_2P_1$ 、 $P_1P_2P_2P_1$,横波反射 P_1S_1 、 $P_1S_2S_2S_1$ 、 $P_1S_2P_2S_1$ 、 $P_1P_2S_2S_1$ 、 $P_1P_2P_2S_1$; 介质 3 内存在纵波透射 $P_1S_2P_3$ 、 $P_1P_2P_3$,横波透射 $P_1S_2S_3$ 、 $P_1P_2S_3$ ^[17]。则横波反射位移可以表示为

$$u_{s\Delta 1} = (f_s h_s) A_p r_{s1} e^{i\phi_{s1}} \exp[i\omega(p_s x - t)] \quad (1)$$

式中,

$$\begin{aligned} r_{s1} &= \sqrt{A_{s1}^2 + B_{s1}^2}; \phi_{s1} = \arctan(B_{s1}/A_{s1}); \\ A_{s1} &= R_{p1s1} + T_{p1s2} R_{p1s2s2} T_{p1s2s2s1} \cos(\phi_{p1s2s2s1}) + \\ &T_{p1s2} R_{p1s2p2} T_{p1s2p2s1} \cos(\phi_{p1s2p2s1}) + T_{p1p2} R_{p1p2s2} T_{p1p2s2s1} \times \\ &\cos(\phi_{p1p2s2s1}) + T_{p1p2} R_{p1p2p2} T_{p1p2p2s1} \cos(\phi_{p1p2p2s1}); \end{aligned}$$

$$B_{s_1} = T_{p_1s_2} R_{p_1s_2s_2} T_{p_1s_2s_2s_1} \sin(\varphi_{p_1s_2s_2s_1}) + \\ T_{p_1s_2} R_{p_1s_2p_2} T_{p_1s_2p_2s_1} \sin(\varphi_{p_1s_2p_2s_1}) + T_{p_1p_2} R_{p_1p_2s_2} T_{p_1p_2s_2s_1} \times \\ \sin(\varphi_{p_1p_2s_2s_1}) + T_{p_1p_2} R_{p_1p_2p_2} T_{p_1p_2p_2s_1} \sin(\varphi_{p_1p_2p_2s_1});$$

u_{s_1} 为反射横波的总位移; f_s 及 h_s 为位移矢量的水平和垂直方向余弦; A_p 为入射纵波的振幅; ω 为圆频率; x 为位置坐标; t 为时间; $R_{p_1s_1}$ 为 P_1 波在界面 1 处的横波反射系数; $T_{p_1p_2} T_{p_1s_2}$ 为 P_1 波在界面 1 处的纵、横波透射系数; $R_{p_1p_2p_2} R_{p_1p_2s_2}$ 为 P_1P_2 波在界面 2 处的纵、横波反射系数; $R_{p_1s_2p_2} R_{p_1s_2s_2}$ 为 P_1S_2 波在界面 2 处的纵、横波反射系数; $T_{p_1p_2p_2s_1} T_{p_1p_2s_2s_1} T_{p_1s_2p_2s_1} T_{p_1s_2s_2s_1}$ 分别为 $P_1P_2P_2$ 、 $P_1P_2S_2$ 、 $P_1S_2P_2$ 、 $P_1S_2S_2$ 等波在界面 1 处的横波透射系数。

以上各个系数可根据刘洋等^[22]推导的各向异性介质界面上的反射和透射系数计算公式求得。

由式(1)可知横波反射波的位移 u_{s_1} 的振幅为 $A_p r_{s_1}$, 根据转换波反射系数的定义可知转换波反射系数为 r_{s_1} 。

3 计算实例

为了考察 EDA 介质各向异性参数对于转换波反射系数随入射角变化的影响, 选用了两种不同 EDA 介质的各向同性背景参数, 在计算煤层弹性常数时采用 Cheng 模型^[23], 模型的岩石物理特性参数见表 1^[22]。选用端点放炮的二维地震观测系统, 取道间距为 5 m, 炮间距为 5 m, 炮点与检波点相间排列, 震源采用频率为 100 Hz 的 Ricker 子波。在计算时, 假定 P 波从上层介质入射, 测线方位角为 90° , 入射角范围为 $0 \sim 48^\circ$ 。

表 1 模型的岩石物理特性参数
Table 1 Petrophysical characteristic of models

类 型	各向同性参数		裂隙密度	裂隙开度	裂隙填充物的 体积模量/kPa	密度 $\rho /$ ($g \cdot cm^{-3}$)	厚度/m
	$v_p / (m \cdot s^{-1})$	$v_s / (m \cdot s^{-1})$					
各向同性	3 710	1 990				2. 60	350
EDA	1 960	1 090	0. 05			1. 30	0. 5
			0. 10	0. 001 0	0		2. 0
			0. 15	0. 001 5	2		3. 5
	2 200	1 100	0. 20				5. 0
							6. 5
EDA2							8. 0
							9. 5
							11. 0
各向同性	3 710	1 990				2. 60	900

注: EDA 介质裂隙填充物的体积模量为 0, 相当于空裂隙; 裂隙填充物的体积模量为 2 kPa, 相当于含气裂隙; 裂隙填充物的体积模量为 2 250 kPa, 相当于含水裂隙。

为了考察煤层厚度、裂隙密度、裂隙开度以及裂隙填充物等因素对于薄层反射系数的影响, 文中根据煤层地层设计了不同的裂隙厚度、裂隙密度、裂隙开度, 并选用了不同的裂隙填充物, 见表 1。

图 2 反映了不同层厚的薄层的反射系数, 所用裂隙密度为 0. 2, 裂隙开度为 0. 002, 裂隙填充物的体积模量为 2 kPa; 图 3 给出了不同裂隙密度时薄层的反射系数, 所用薄层厚度为 2 m, 裂隙开度为 0. 002, 裂隙填充物的体积模量为 2 kPa; 图 4 给出了不同裂隙开度时薄层的反射系数, 所用裂隙密度为 0. 2, 薄层厚度为 2 m, 裂隙填充物的体积模量为 2 kPa; 图 5 反映了裂隙填充物对于薄层反射系数的影响, 所用裂隙密度为 0. 2, 薄层厚度为 2 m, 裂隙开度为 0. 002。

从图 2~5 中可以得出:

(1) 薄层的厚度对于薄层的转换波反射系数存

在较大的影响。入射角为 0 时, 转换波反射系数为 0; 随着入射角的增大, 转换波反射系数先增大到一个最大值, 然后开始减小; 随着厚度的增加, 这个最大值以及达到最大值时的入射角都随之增大(图 2)。

(2) 裂隙密度对于薄层转换波反射系数的影响相对较小。小角度入射时, 裂隙密度对于转换波反射系数几乎没有影响; 随着入射角的增大, 裂隙密度的影响逐渐增大, 并且随着裂隙密度的增大, 转换波反射系数的陡度逐渐增大(图 3)。

(3) 裂隙开度对于薄层转换波反射系数几乎没有影响。随着入射角的增大, 转换波反射系数先增大到一个最大值, 然后开始减小(图 4)。

(4) 裂隙填充物对于薄层转换波反射系数影响相对较小。入射角较小时, 裂隙填充物对于转换波反射系数几乎没有影响; 随着入射角的增大, 裂隙填充

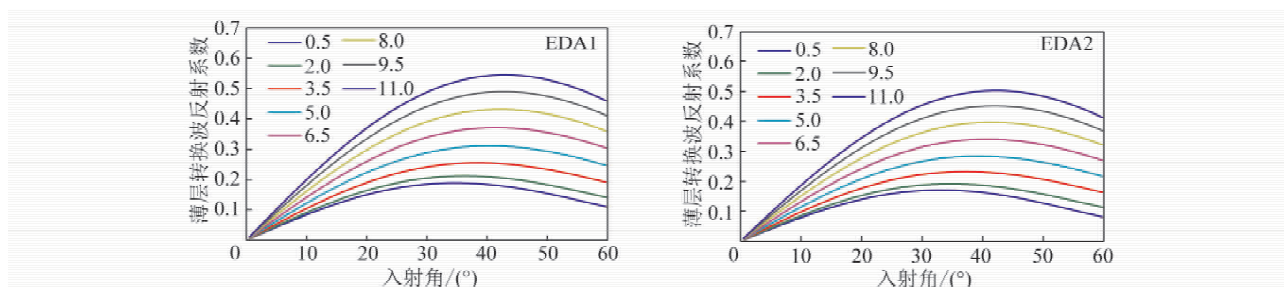


图2 薄层厚度对薄层转换波反射系数的影响

Fig. 2 Effect of different bed thickness on the reflection coefficient of converted wave

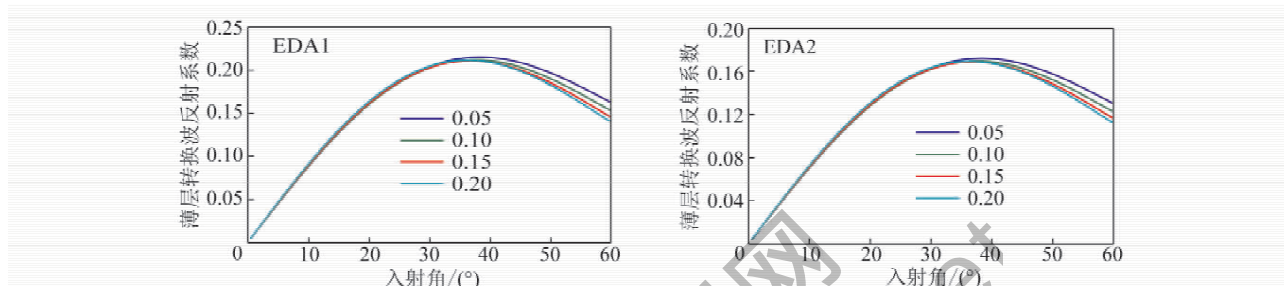


图3 裂隙密度对薄层转换波反射系数的影响

Fig. 3 Effect of different fracture density on the reflection coefficient of converted wave

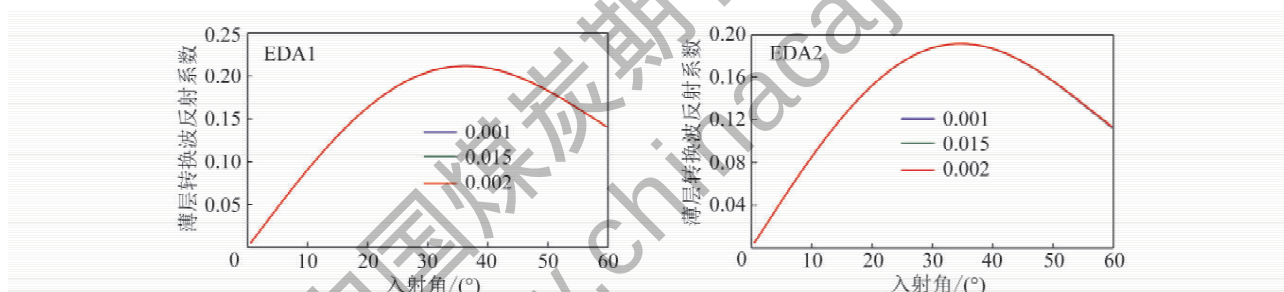


图4 裂隙开度对薄层转换波反射系数的影响

Fig. 4 Effect of different aspect ratio on the reflection coefficient of converted wave

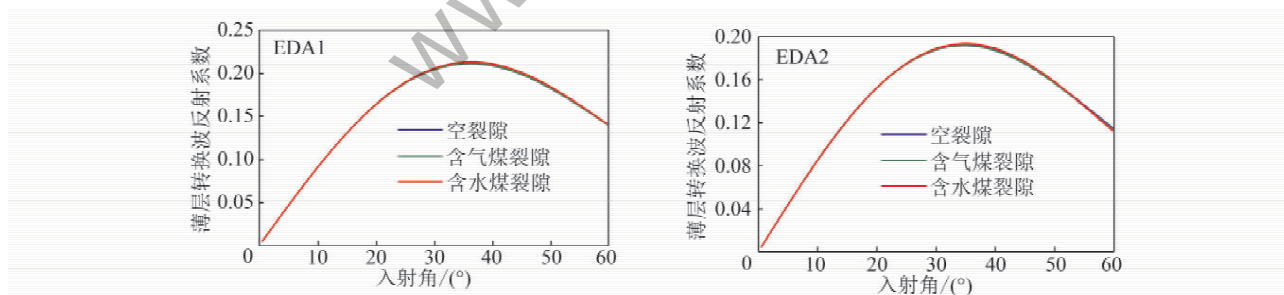


图5 裂隙填充物对薄层转换波反射系数的影响

Fig. 5 Effect of different filling material on the reflection coefficient of converted wave

物的影响逐渐增大,并且随着裂隙内填充物的体积模量的增大,转换波反射系数的陡度逐渐增大(图5)。

(5) 不同的 EDA 介质的各向同性背景参数对薄层的转换波反射系数有一定的影响,这种影响在裂隙密度以及不同填充物的情况下体现得比较明显。

4 结 论

(1) 入射角为 0 时,薄煤层转换波反射系数为 0,

随着入射角的增大,反射系数先增大到一个最大值,然后开始减小,并且薄层转换波反射系数受多种因素的影响。

(2) 薄层的厚度、煤层中裂隙的密度、EDA 介质的各向同性背景参数对于薄层转换波的反射系数都有较大的影响,随着薄层厚度以及裂隙密度的增加,反射系数曲线的陡度增加,随着入射角的增大,这 3 种因素对于反射系数的影响也增大。

(3) 裂隙的开度以及裂隙的填充物对于薄层转换波的反射系数的影响相对较小,随着入射角的增大,这两种因素对于反射系数的影响也相对增大。

参考文献:

- [1] 孙鹏远,孙建国,卢秀丽. P-SV 波 AVO 方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(4): 602-607.
Sun Pengyuan, Sun Jianguo, Lu Xiuli. Progress in research on the method of P-SV wave AVO [J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(4): 602-607.
- [2] Bortfeld R. Approximation to the reflection and transmission coefficients of plane longitudinal and transverse waves [J]. Geophysical Prospecting, 1961, 9: 485-502.
- [3] Richards P G, Frasier C W. Scattering of elastic waves from depth-dependent in homogeneities [J]. Geophysics, 1976, 41: 441-458.
- [4] 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 application [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1991, 26(2): 129-144.
- [5] Donati M, Martin N. Making AVO analysis for converted wave a practical issue [A]. 68th Ann. Internat. Mgt. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstract [C]. 1998: 1421-1424.
- [6] Gonzalez E F. Facies classification using P-to-P and P-to-S AVO attributes [A]. 70th Ann. Internat. Mgt. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstract [C]. 2000: 1-14.
- [7] Xu Y, Bancroft J C. Joint AVO analysis of PP and PS data [R]. Crewes Research Reports 34, 1997: 1-44.
- [8] 勾精为,姚 陈,于光明. 用转换波检测煤层裂隙的方法探讨[J]. 中国煤田地质, 2001, 13(3): 52-56.
Gou Jingwei, Yao Chen, Yu Guangming. Probe into method on exam of coal-bed fractures with transformed wave [J]. Coal Geology of China, 2001, 13(3): 52-56.
- [9] 王 赞,高 远,接铭训. 煤系地层裂缝裂隙发育带的预测[J]. 煤炭学报, 2003, 28(6): 566-568.
Wang Yun, Gao Yuan, Jie Mingxun. The prediction of fractured zone in coal-series strata [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(6): 566-568.
- [10] 何兵寿,彭苏萍,张会星,等. 煤体中直立裂隙的多波地震响应及预测[J]. 地质学报, 2008, 82(10): 1416-1421.
He Bingshou, Peng Suping, Zhang Huixing, et al. The multi-components seismic response of vertical fracture in coal beds and its probing [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(10): 1416-1421.
- [11] 甘文权,董良国,马在田. 含裂隙介质中横波分裂现象的数值模拟[J]. 同济大学学报, 2000, 28(5): 547-551.
Gan Wenquan, Dong Lianguo, Ma Zaitian. Numerical modeling and study of the shear wave-splitting in fracture media [J]. Journal of Tongji University, 2000, 28(5): 547-551.
- [12] 王 磊,何兵寿. 煤层转换波的数值模拟及应用[J]. 石油物探, 2004, 43(5): 475-479.
Wang Lei, He Bingshou. Numerical modeling of coal converted waves and its application [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004, 43(5): 475-479.
- [13] 杨德义,彭苏萍,王 赞,等. 含裂隙煤层的地震记录模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(6): 61-66.
Yang Deyi, Peng Suping, Wang Yun, et al. Seismic record simulation for coal-seam containing fractures [J]. Coal Geology and Exploration, 2007, 35(6): 61-66.
- [14] 王建华. 叠前弹性参数反演新方法[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [15] 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.
- [16] 魏修成. 含裂隙地层各向异性研究[D]. 北京: 中国石油大学, 1992.
- [17] 邓小娟,彭苏萍,林庆西,等. 基于各向异性薄煤层的 AVO 正演方法研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2053-2058.
Deng Xiaojuan, Peng Suping, Lin Qingxi, et al. AVO forward method of anisotropic thin coal bed [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2053-2058.
- [18] 张秉铨,董敏煜,钱忠平. 各向异性介质中的入射角、反射角和透射角[J]. 地震学报, 1999, 21(4): 374-378.
Zhang Bingming, Dong Minyu, Qian Zhongping. Incidence, reflection and transmission angles in anisotropic media [J]. Acta Seismologica Sinica, 1999, 21(4): 374-378.
- [19] 吴国忱. 各向异性介质地震波传播与成像[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2006.
- [20] 何樵登,张中杰. 横向各向同性介质中地震波及其数值模拟[M]. 吉林: 吉林大学出版社, 1996.
- [21] 高 乐,刘 媛,马劲风. 对各向异性介质中横波分裂现象的认识[J]. 西北大学学报(自然科学网络版), 2006, 4(2): 0202.
Gao Le, Liu Yuan, Ma Jinfeng. A note on shear-wave splitting in anisotropic medium [J]. Science Journal of Northwest University Online, 2006, 4(2): 0202.
- [22] 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.
- [23] Cheng C H. Crack models for a transversely anisotropic medium [J]. Geophys. Res., 1993, 98: 675-684.