

文章编号: 1001-1986(2010)02-0063-05

含煤地层各向异性介质有限差分数值模拟

钱 进^{1,2}, 崔若飞^{1,2}, 陈同俊^{1,2}

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;
2. 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 煤储层是一种双重孔隙介质, 其孔隙由基质孔隙和裂隙组成, 并具有自身独特的割理系统。传统的煤田地震勘探将煤层假设为单一的各向同性介质, 没有考虑其中裂隙对煤层的影响。利用交错网格高阶有限差分算法, 分别对不同厚度 VTI 和 HTI 型煤层的弹性波传播特征进行数值模拟, 获得波场快照和含煤层状介质的地震模拟记录。从波场快照中可以看出, 弹性波在 VTI 和 HTI 型煤层中传播存在明显差异; 煤层厚度变化对波场的敏感性要强于煤层类型的变化。

关键词: 各向异性; 交错网格; 有限差分; 数值模拟

中图分类号: P631 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.02.016

Anisotropic numerical simulation of coal-bearing strata with finite-difference

QIAN Jin^{1,2}, CUI Ruofei^{1,2}, CHEN Tongjun^{1,2}

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process, Key Laboratory of the Ministry of Education, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Coal reservoir is a dual porous rock composed of matrix porosity and fracture with its unique cleat system. However, coal is usually assumed to be an isotropic medium in the traditional coal seismic exploration, and the impacts of fractures on seam are not taken into account. Elastic wave propagation of VTI (transversely isotropic with a vertical symmetry axis) and HTI (transversely isotropic with a horizontal symmetry axis) coal with different thicknesses were simulated by high-order finite-difference of staggered-grid respectively to obtain wave snapshots of homogeneous coal and seismic records of coal-bearing layered strata. By comparative analysis, it was found that evident differences of elastic wave propagation exists between VTI and HTI homogeneous coal, that changes in coal thickness are more sensitive to wave field than the changes in coal type from the layered seismic simulation records.

Key words: anisotropy; staggered-grid; finite difference; numerical simulation

传统地震勘探常将地层介质简化为水平层状各向同性介质。在煤田地震勘探中, 假设煤层为各向同性介质, 并没有考虑煤层中裂隙对煤层的影响。近年来, 随着对煤储层的深入研究, 普遍认为煤层是一种双重孔隙岩层, 由基质孔隙和裂隙组成, 并具有自身独特的割理系统^[1]。董守华在做煤岩速度测试时发现煤样具有弱各向异性性质, 并计算了煤弹性常数和各向异性系数等^[2]。目前, 地震各向异性是岩性地震勘探的研究热点, 利用地震各向异性预测煤层瓦斯富集区域也是当前的热点课题^[3-4]。

本文利用弹性波交错网格高阶有限差分算法,

对 VTI(Transversely isotropic with a vertical symmetry axis)和 HTI(Transversely isotropic with a horizontal symmetry axis)两种典型煤各向异性介质的弹性波传播特征进行数值模拟, 获得地震波场和地震模拟记录; 并分析其地震响应特征规律, 为煤层各向异性地震勘探提供理论基础和技术支撑。

1 各向异性弹性波方程

弹性波数值模拟技术是理解地震波在不同介质中的传播规律, 正确认识和解释地震波信号所携带地质信息的重要手段^[5-6]。Alterman 和 Karal 首先将有限

收稿日期: 2009-06-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB209406); 国家自然科学基金项目(40874054); 国家青年科学基金项目(40804026)

作者简介: 钱 进(1982—), 男, 江苏姜堰人, 博士研究生, 从事地震波传播数值模拟及地震资料处理工作。

差分法应用于层状介质弹性波传播的数值模拟中^[7]。Virieux 提出了应用速度-应力一阶方程交错网格有限差分模拟 P-SV 波在非均匀介质中的传播^[8]。Levander 采用四阶空间有限差分算子计算弹性波的地震记录^[9]。Tsinggas 也根据速度和应力方程对横向各向同性介质的弹性波数值模拟用有限差分法做过研究^[10]。

通过简单的变换，介质的本构方程可写成

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} = c_{ijkl} v_{k,l}, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3, \quad (1)$$

式中 τ_{ij} 为应力； c_{ijkl} 为介质的弹性常数； $v_{k,l}$ 为速度。

再根据牛顿第二定律可以建立介质的速度与应力关系，

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

式中 ρ 为密度。

式(1)和式(2)即为用速度和应力表示的介质一阶弹性波方程组。

2 VTI 和 HTI 等效介质理论

地震数值模拟需要煤层相应的弹性常数 c_{ij} ，对于 VTI 型煤层，对 Thomson^[11]给出的参数进行简单变形可得

$$\begin{cases} c_{33} = \rho \alpha^2 \\ c_{44} = \rho \beta^2 \\ c_{11} = c_{33}(1 + 2\varepsilon) \\ c_{66} = c_{44}(1 + 2\gamma) \\ c_{13} = (-2c_{44} + \sqrt{4c_{44}^2 - 4(c_{33}(2c_{44}(1 + \delta) - c_{33}(1 + 2\delta)))/2} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 α 和 β 是沿垂直对称轴方向传播的纵波和横波速度； ε 、 γ 、 δ 是 VTI 型煤层的各向异性参数。

从式(3)中可知，如果煤层的 α 、 β 、 ε 、 γ 、 δ 已知，就可以计算出 VTI 型煤层的弹性常数 c_{ij} 。

对于 HTI 型煤层，Rüger^[12]利用 VTI 型模型进行等效，并给出了它们之间等效关系的表达式，经简单变形得到

$$\begin{cases} c_{33} = \rho V_{P0}^2 (1 + 2\varepsilon) \\ c_{44} = \rho V_{S0}^2 (1 + 2\gamma) \\ c_{11} = c_{33} (1 + 2\varepsilon) \\ c_{66} = c_{44} (1 + 2\gamma) \\ c_{13} = (-2c_{55} + \sqrt{4c_{55}^2 - 4(c_{33}(2c_{55}(1 + \delta^{(V)}) - c_{33}(1 + 2\delta^{(V)})))/2} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 V_{P0} 和 V_{S0} 是沿水平对称轴方向传播的纵波和横波速度； ε 、 γ 、 δ 是 VTI 型煤层的各向异性参数； $\delta^{(V)}$ 是 HTI 型煤层的各向异性参数，

$$\delta^{(V)} = (\delta - 2\varepsilon(1 + \varepsilon/f)) / ((1 + 2\varepsilon)(1 + 2\varepsilon/f)); \quad (5)$$

$$f = 1 - V_{S0}^2 / V_{P0}^2. \quad (6)$$

如果已知 VTI 型煤层的 α 、 β 、 ε 、 γ 、 δ ，就可以根据式(4)、式(5)和式(6)计算出 HTI 型煤层的弹性常数 c_{ij} 。

3 交错网格高阶有限差分算法

在波动方程的差分解法上，采取交错网格的方法^[13]，在二维的情况下，将式(1)和式(2)展开得

$$\begin{cases} u_{i,j}^{m+1/2} = u_{i,j}^{m-1/2} + \frac{\Delta t}{\rho_{ij}} (D_{x+}[\tau_{xx\ i,j}]^m + D_{z+}[\tau_{xz\ i,j}]^m), \\ w_{i,j}^{m+1/2} = w_{i,j}^{m-1/2} + \frac{\Delta t}{\rho_{ij}} (D_{x-}[\tau_{xz\ i,j}]^m + D_{z-}[\tau_{zz\ i,j}]^m), \\ \tau_{xx\ i,j}^{m+1} = \tau_{xx\ i,j}^m + \Delta t (c_{11\ ij} D_{x-}[u_{ij}]^{m+1/2} + c_{13\ ij} D_{z+}[w_{ij}]^{m+1/2} + c_{15\ ij} D_{z-}[u_{ij}]^{m+1/2} + D_{x+}[w_{ij}]^{m+1/2}), \\ \tau_{zz\ i,j}^{m+1} = \tau_{zz\ i,j}^m + \Delta t (c_{13\ ij} D_{x-}[u_{ij}]^{m+1/2} + c_{33\ ij} D_{z+}[w_{ij}]^{m+1/2} + c_{35\ ij} D_{z-}[u_{ij}]^{m+1/2} + D_{x+}[w_{ij}]^{m+1/2}), \\ \tau_{xz\ i,j}^{m+1} = \tau_{xz\ i,j}^m + \Delta t (c_{15\ ij} D_{x-}[u_{ij}]^{m+1/2} + c_{35\ ij} D_{z+}[w_{ij}]^{m+1/2} + c_{55\ ij} D_{z-}[u_{ij}]^{m+1/2} + D_{x+}[w_{ij}]^{m+1/2}). \end{cases} \quad (7)$$

式中 u 、 w 、 τ_{xx} 、 τ_{zz} 、 τ_{xz} 分别为 v_i 和 τ_{ij} 各自的分量； D_{x+} 、 D_{x-} 、 D_{z+} 和 D_{z-} 分别是 x 和 z 方向的向前和向后差分的偏微分因子。

初始条件为：当 $t \leq 0$ 时， $u = w = \tau_{xx} = \tau_{zz} = \tau_{xz} = 0$ 。所以，初始时刻 $m=0$ 时， $u_{i,j}^{m+1/2} = w_{i,j}^{m+1/2} = \tau_{xx\ i,j}^{m+1} = \tau_{zz\ i,j}^{m+1} = \tau_{xz\ i,j}^{m+1} = 0$ ，再由式(7)可以分别计算出 $u_{i,j}^{m+3/2}$ 、 $w_{i,j}^{m+3/2}$ 、 $\tau_{xx\ i,j}^{m+2}$ 、 $\tau_{zz\ i,j}^{m+2}$ 和 $\tau_{xz\ i,j}^{m+2}$ ，依次递推计算出整个波场。

震源函数为

$$R(t) = (1 - 2 * (\pi * (f - t/2))^2) * \exp(-\pi * (f - t/2)^2), \quad (8)$$

加载在 τ_{xx} 和 τ_{zz} 上，每次递推计算之前加载震源。其中 f 为主频， t 为子波延时。

由于只能对有限区域进行数值模拟，必然会产生边界反射的影响。为消除这种边界反射，此处采用 Collino 等给出的一阶应力-速度弹性波方程完全匹配层吸收边界条件^[14]，取得了不错的效果。

稳定性条件^[15]为

$$\Delta t \sqrt{3} \times \sqrt{S/\rho} \leq 1 / \sum_{l=1}^L |a_l|, \quad (9)$$

式中 $S = \max\{c_{11}/\Delta x^2, c_{55}/\Delta x^2, c_{66}/\Delta x^2, c_{33}/\Delta z^2, c_{44}/\Delta z^2, c_{55}/\Delta z^2\}$ ； c 为各向异性介质的弹性常数； ρ 为密度； a_l 为有限差分系数。

4 数值模拟与分析

4.1 地质模型与参数设计

地震数值模拟采用董守华测试煤样各向异性参

数时的 14 号煤样。该煤样采自山东兖州矿区 3 号煤层。该区 3 号煤层顶底板岩性多数为砂质泥岩, 煤层埋深 400 m 左右, 平均厚度为 3.47–8.69 m^[16]。表 1 给出了砂质泥岩和 VTI 型煤层与围岩物性参数^[2], 用式(3)和式(4)可以分别计算 VTI 和 HTI 型煤层的弹性常数。

表 1 岩石物性参数表
Table 1 Petrophysical parameters

岩性	纵波速度 /m·s ⁻¹	横波速度 m·s ⁻¹	密度 /g·cm ⁻³	各向异性系数		
				ϵ	γ	δ
砂质泥岩	4 000	2 100	2.65	0	0	0
VTI 型煤层	2 029	982	1.43	0.18	-0.17	0.29
HTI 型煤层	2 366	1 234	1.43	-0.13	0.29	-0.30

4.2 实例分析

4.2.1 均匀介质

根据表 1 中的岩石物性参数分别建立均匀 VTI 和 HTI 型煤层模型, 模型尺寸为 2 000 m × 2 000 m, 空间采样间隔为 $\Delta x = \Delta z = 5$ m, 时间采样间隔为 $\Delta t = 0.5$ ms, 记录长度为 0.5 s。震源子波主频为 60 Hz, 位于(1 000 m, 1 000 m)处。对模型采用精度为 $O(\Delta t^2, \Delta x^2)$ 的交错网格高阶有限差分法进行数值模拟。图 1a 和图 1b 分别为 VTI 和 HTI 型煤层在 0.3 s 时的波场快照, 纵横坐标为记录道数, 单位为相对值。

从图 1 中可以看出, 在 VTI 和 HTI 型煤层中存在两类波: —— 拟 P 波(qP)和 —— 拟 SV 波(qSV)。拟 qSV 波在 2 个对角线方向上出现分叉现象。而且, VTI 和 HTI 型煤层在沿各自垂直对称轴方向传播的速度明显要大于沿对称轴方向, 即速度在沿裂隙方向的传播速度要大于沿裂隙的垂直方向。这是利用地震各向异性能够预测裂隙发育方向的原理, 同时也验证了上述式(3)和式(4)的正确性。

4.2.2 层状介质

利用表 1 中岩石物性参数建立二维层状模型来观察 VTI 和 HTI 型煤层反射波特征。该模型由顶底板砂质泥岩(各向同性)、煤层(埋深 400 m, 厚度为 5 m 或 10 m)和底板砂质泥岩(各向同性)3 层组成。模型大小、空间和时间采样间隔、记录长度和震源子波主频以及有限差分精度与上述均匀介质模型相同。考虑到交错网格高阶有限差分和边界条件的应用, 将震源位于(1 000 m, 80 m)处, 接收排列在深度 60 m, 水平分布。分别对不同厚度和类型的煤层进行数值模拟, 模拟结果见图 2。地震模拟记录分为水平分量和垂直分量, 其中纵坐标 x 为记录道数, 单位为相对值; 横坐标 z 为记录时间, 单位为 s。

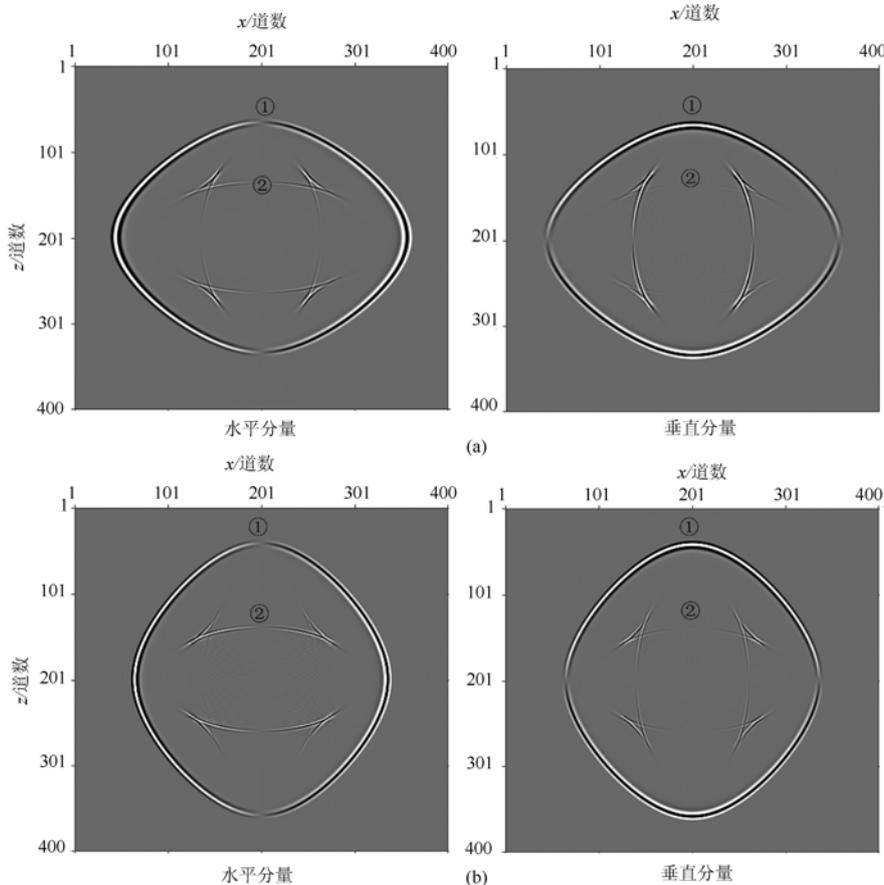


图 1 0.3 s 时的波场快照

Fig. 1 Wave snapshot at 0.3 s

a—— VTI 型煤层; b—— HTI 型煤层; —— 拟 P 波(qP); —— 拟 SV 波(qSV)

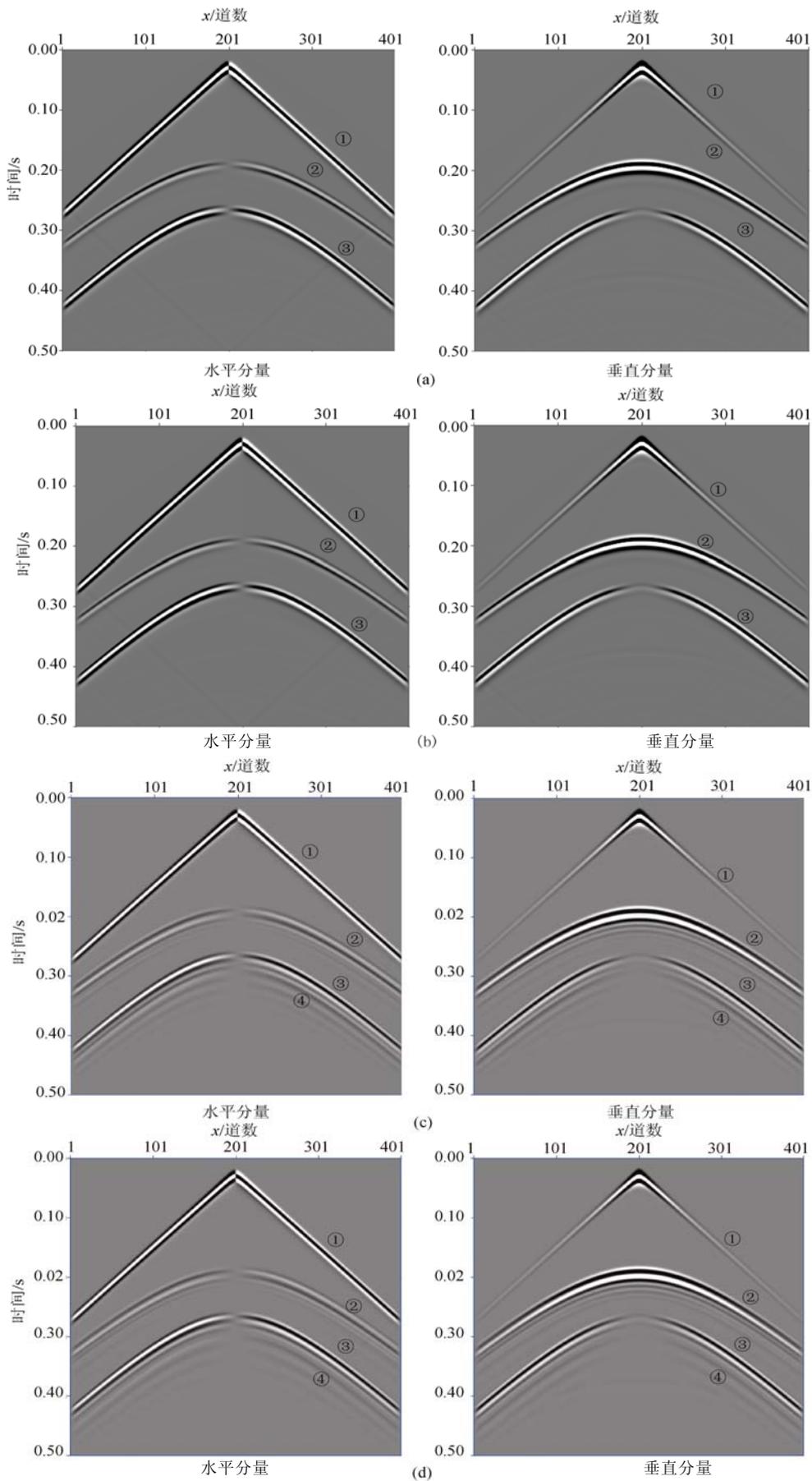


图 2 地震模拟记录

Fig. 2 Seismic records of simulation

a—5 m 厚 VTI 型煤层; b—5 m 厚 HTI 型煤层; c—10 m 厚 VTI 型煤层; d—10 m 厚 HTI 型煤层

从图 2 中可以看出, 地震模拟记录中共包含四类波: 为直达纵波(P); 为煤层反射纵波(PP)、为煤层反射横波(PS); 为多次波。对于不同厚度和类型的煤层, PP 与 PS 均为煤层顶底板反射的复合波, 无法进行分离, 见图 2a 和图 2b, 且垂直分量中 PP 能量要强于 PS, 这取决于弹性分界面的纵横波反射系数; 而水平分量则与之相反, 这主要是因为弹性波波场的传播过程中存在模式转换和能量转换^[16]。但随着煤层厚度的增加, 煤层反射波会在煤层顶底板发生连续反射, 从而导致了煤层中有多次波的出现, 这一现象在 PS 波上反映比 PP 波明显, 见图 2c 和图 2d。尽管 VTI 和 HTI 型煤层的弹性常数存在差异, 但单纯地从地震模拟记录中只能观测出相同类型不同厚度的差异, 而不能观测出不同类型相同厚度的差异, 因此单纯从地震记录并不能判断煤层的类型。

5 结 论

a. VTI 和 HTI 型煤层在沿各自垂直对称轴方向传播的速度明显要大于沿对称轴方向, 即速度在沿裂隙方向的传播速度要大于沿裂隙的垂直方向, 这是利用地震各向异性能够预测裂隙发育方向的原理。

b. 尽管 VTI 和 HTI 型煤层因对称轴的不同引起两者弹性常数有着显著差异, 但由于煤层是薄层, 所以从地震模拟记录上仅仅能观测出不同厚度煤层之间的地震响应特征存在差异, 而不能观测出由煤层类型不同引起的差异。

总之, 利用地震各向异性解决煤层中的裂隙问题是煤田地震勘探的发展方向, 这将为煤层气勘探与开发提供强有力的理论基础和技术支撑, 但也要考虑到煤层是薄层等实际问题。

(上接第 62 页)

的研究中考虑衰减因素, 加入反射波、折射波等规则干扰波和随机不规则干扰合成多波记录, 来研究检验各种频散求取方法的抗干扰能力和稳定性。

参考文献

- [1] 杨成林. 瑞雷波勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1993
- [2] 张碧星, 鲁来玉. 用频率-波数法分析瑞利波频散曲线[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(4): 245-255.
- [3] 彭文, 王亮. 瑞雷面波频散特征的时频分析方法及应用[J]. 物探计算技术, 2006, 28(3): 233-237.
- [4] DONG-SOO KIM, HYUNG-CHOON P. Determination of dispersive phase velocities for SASW method using harmonic wavelet transform[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineer-

参考文献

- [1] 苏现波, 林晓英. 煤层气地质学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007.
- [2] 董守华. 地震资料煤层横向预测与评价方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004.
- [3] 杨德义, 彭苏萍. 多分量地震勘探技术的现状及进展[J]. 中国煤田地质, 2003, 15(1): 51-57.
- [4] 石瑛, 王赞, 芦俊. 用 3CVSP 资料分析含煤地层的方位各向异性[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 813-817.
- [5] 魏修成, 董敏煜. 非均匀各向异性介质中弹性波的传播[J]. 地震学报, 1998, 20(6): 561-572.
- [6] 裴正林, 牟永光. 地震波传播数值模拟[J]. 地球物理学进展, 2004, 10(4): 933-941.
- [7] ALTERMAN Z, KARAL JR F C. Propagation of elastic waves in layered media by finite difference methods[J]. Bull Seism Soc Am, 1968, 58: 367-398.
- [8] VIRIEUX J. P-SV wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method[J]. Geophysics, 1986, 51(4): 889-901.
- [9] LEVANDER A R. Fourth-order finite-difference P-SV seismograms[J]. Geophysics, 1988, 53(11): 1425-1436.
- [10] TSINGAS C, VAFIDIS A, KANSEWICH E R. Elastic wave propagation in transversely isotropic media using finite differences[J]. Geophysical Prospecting, 1990, 38(8): 933-949.
- [11] THOMSEN L. Weak elastic anisotropy[J]. Geophysics, 1986, 51(10): 1954-1966.
- [12] ANDREAS R. Reflection coefficients and azimuthal AVO analysis in anisotropic media[D]. Colorado: Colorado School of Mines, 1996.
- [13] CHRISTOPHER J. Finite-difference elastic wave propagation in 2D heterogeneous transversely isotropic media[J]. Geophysical Prospecting, 1995, 43(6): 843-858.
- [14] FRANCIS C, CHRYSOULA T. Application of the perfectly matched absorbing layer model to the linear elastodynamic problem in anisotropic heterogeneous media[J]. Geophysics, 2001, 66(1): 294-307.
- [15] 牟永光, 裴正林. 三维复杂介质地震数值模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [16] 韩宝平, 冯启言, 刘瑞新. 鲍店煤矿四采区涌水规律分析[J]. 煤田地质与勘探, 1996, 24(4): 35-38.

ing, 2002, 22: 675-684.

- [5] 姜建国, 曹建中, 高玉明. 信号与系统分析基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 85-91.
- [6] 杨天春, 何继善, 吕绍林, 等. 三层层状介质中瑞利波的频散曲线特征[J]. 物探与化探, 2004, 28(1): 41-45.
- [7] 关小平, 黄嘉正, 周鸿秋. 工程勘探中稳态瑞利面波法解释理论的探讨[J]. 地球物理学报, 1993, 36(1): 96-105.
- [8] 张碧星, 肖柏勋, 杨文杰, 等. 瑞利波勘探中“之”字形频散曲线的形成机理及反演研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(4): 557-56.
- [9] 张碧星, 鲁来玉, 鲍光淑. 瑞利面波勘探中“之”字形频散曲线研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(2): 263-272.
- [10] 单琳娜, 程志平. 高阶模态面波在软弱薄层探测中的应用[J]. 桂林工学院学报, 2004, 24(2): 155-157.