

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1923

不同煤岩介质模型的波场特征研究

陈 栋^{1,2}, 王恩元^{1,2}, 李 楠³

(1. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116;
3. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 准确和形象地分析煤矿微地震波在不同介质中的传播规律, 能够为煤矿主动地震勘探以及反演煤矿不同区域内部介质结构提供有效的理论依据。基于二维介质模型, 以煤矿典型的煤、岩单一均匀介质模型、煤岩组合多层介质模型、含断层煤岩介质模型以及含水煤岩双相介质模型为例, 利用高阶有限差分法对不同煤岩介质进行了波场模拟, 分析不同介质的波场特征。研究表明, 高阶有限差分法可以准确、形象地得到煤岩不同介质条件下的纵横波的波场特征; 不同介质模型的波场特征各不相同, 在多层煤岩介质中不同介质的分界面会发生纵横波的反射、透射和转换, 产生透射波、透射转换波、反射波和反射转换波; 在含断层煤岩介质中断层处不仅可以产生透射波、透射转换波、反射波和反射转换波, 还可以发生绕射产生绕射波; 在含水煤岩双相介质中不仅有快纵波和横波, 也会产生慢纵波。不同时刻的波场快照可以进一步形象地描述波场动态特征, 都为矿山微震波场分析打下了理论基础。

关 键 词: 煤岩; 波动方程; 高阶有限差分法; 不同介质; 波场模拟

中图分类号: TD324

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 增 1-0449-11

Study on wave field characteristics of different media models of coal and rock

CHEN Dong^{1,2}, WANG En-yuan^{1,2}, LI Nan³

(1. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
3. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Accurately and vividly analyzing the propagation law of microseismic wave in different media of coal and rock can provide strong theoretical basis for active seismic exploration in the coal mine and the inversion on the media structure in the different regions. In this paper, based on two-dimensional media models in the coal mine, including the general homogeneous medium model of coal/rock, the multi-media model combining the coal and rock, the fault-bearing medium model of coal and rock and water-bearing two phase medium model of coal and rock, the wave field simulations of different media above are carried out using the high-order finite-difference method and the wave field characteristics are analyzed. The results show that the high-order finite difference method is powerful in accurately obtaining the wave field characteristics of P- and S-wave in different media models. Different wave field characteristics appear in different media models. In the multi-layered media of coal and rock, the reflection, transmission and transition of P and S wave occur at the interfaces of different media, and the transmissive wave, the transmitted converted wave, the reflected wave and the reflected converted wave appear. In the fault-bearing media model of coal and rock, not only the transmissive wave, the transmitted converted wave, the reflected wave and the reflected converted wave can occur, but also the diffracted wave can appear at the fault. In the water-bearing two-phase medium model of coal and rock, not only the fast P-wave and shear-wave, but also the slow P-wave can occur. The snapshots of the wave field at different time can further vividly describe the dynamic characteristics of the wave field, and they can provide the theoretical foundation for analyzing the micro-seismic wave field in the coal mine.

Keywords: coal and rock; wave equation; high order finite difference method; different medium; wave field simulation

收稿日期: 2018-10-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No.51634001); 国家自然科学基金面上项目 (No.51874296); 中国博士后科学基金资助面上一等资助 (No.2018M640533)。

This work was supported by the Key Projects of National Natural Science Foundation of China(51634001), the National Natural Science Foundation of China(51874296), and the China Postdoctoral Science Foundation Grants First-class Funding(2018M640533).

第一作者简介: 陈栋, 男, 1991 年生, 博士研究生, 主要从事矿井煤岩动力灾害防治方面的研究工作。E-mail: 755593538@qq.com

通讯作者: 王恩元, 男, 1968 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事矿井煤岩动力灾害防治方面的研究工作。E-mail: weytop@cumt.edu.cn

1 引言

煤矿深地开采日益增加,与此同时煤矿微震活动也愈发严重,矿井微震监测系统监测到越来越复杂的波场特征^[1-2]。通过数值模拟准确地模拟矿山微地震波在复杂介质中的传播过程,可为主动地震勘探及反演煤矿不同区域内部介质结构提供理论支持和依据,对煤矿微震监测准确度的提高具有重要意义^[3],数值模拟在研究矿山微震破裂过程和评估微震灾害对矿井的破坏都是非常有效的方法^[4-5]。

地震波场数值模拟常用的方法有伪谱法、有限差分法、有限元法等^[5]。在各种地震波正演模拟方法中有限差分法出现的较早,Alterman^[6]和 Karal^[7]在 20 世纪 70 年代就首创性的提出使用有限差分法可以对波动方程求解,并用该方法完成了地震波在均匀介质中正演模拟。随着有限差分法在地震分析领域的广泛应用与研究,有限差分法也得到了不断的发展。Kelly 研究了用有限差分法来合成人工合成地震记录。Virieux^[8]提出了模拟波在非均匀介质中传播的速度应力有限差分法,并且取得了良好的效果。有限差分法具有运行速度快、占用内存小、适用性强等优点,能够迅速和准确地模拟波在各种复杂介质中的传播规律,是勘探地震学中应用最广泛的数值计算方法^[9-10]。

不少学者针对不同介质波场模拟分析^[11-16]以及改进和提高波场模拟方法^[17-20]等方面做了大量研究,董良国等^[21]将交错网格和高阶差分法有机结合,求解横向同性(TI)介质一阶速度应力弹性波方程,首先提出了交错网格高阶有限差分法。裴正林等^[22]将交错网格高阶有限差分模拟方法在三维任意各向异性介质中进行了推广。杨圳等^[23]基于地震波波动方程和有限差分法,针对多种不同的复杂地质模型,进行高阶交错网格地震波场模拟仿真研究。孙楠等^[24]准确地模拟地震波在复杂介质中的传播过程,为分析主动源探测中获得的数据资料及反演区域内部介质结构提供了理论支持和依据。

虽然前人对地震波场做了大量研究,但对煤矿微震波场特征研究不多,本文以波动方程为理论基础^[25],基于二维介质模型,以煤矿典型的煤、岩单一均匀介质模型、煤岩组合多层介质模型、含断层煤岩介质模型以及含水煤岩双相介质模型为例,利用高阶有限差分法^[26]对不同介质进行了波场模拟,分析不同介质的波场特征。为矿山微震的波场分析打下理论基础。

2 波动方程及其有限差分解法

2.1 有限差分原理

有限差分法是基于差分原理的一种数值计算方法,是将需要求解的区域划分为差分网格,然后用有限的网格节点代替连续的求解域,利用微商与差商的近似关系将描述介质传播的微分方程转化为差分方程进行求解^[26-27]。构造差分有多种方法,现在采用的是泰勒级数展开法^[27]。

2.2 二维声波方程有限差分格式的建立

对比分析后发现,时间域 2 阶空间域 4 阶可以更好地模拟该煤岩介质条件下的波场特征,以下展示时间域 2 阶空间域 4 阶的有限差分法。

一般地二维非均匀介质的声波波动方程^[28]可表示为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial z} \right) = \frac{1}{V^2 \rho} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + s(x, z, t) \quad (1)$$

式中: $U=U(x, z, t)$ 为声压; V 为速度; ρ 为密度,随位置的变化而变化; $s(x, z, t)$ 为震源函数。本文研究的都是均匀介质,密度 ρ 是常数,则二维声波波动方程就可以表示为

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + s(x, z, t) \quad (2)$$

令 $U_{m,n}^k = U(m\Delta x, n\Delta z, k\Delta t)$, Δx 、 Δz 为空间间隔, Δt 为时间间隔, k 为时间方向的离散网格, m 为 x 方向的离散网格, n 为 z 方向的离散网格,利用泰勒级数展开式将 $U_{m,n}^{k+1}$ 在 $U_{m,n}^k$ 展开得到式(3),将 $U_{m,n}^{k-1}$ 在 $U_{m,n}^k$ 处展开得到式(4)。

$$U_{m,n}^{k+1} = U(x, z, t + \Delta t) = U_{m,n}^k + \Delta t \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right)_{m,n}^k + \frac{1}{2} \Delta t^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right)_{m,n}^k + \frac{1}{6} \Delta t^3 \left(\frac{\partial^3 U}{\partial t^3} \right)_{m,n}^k + \cdots + O(\Delta t^4) \quad (3)$$

$$U_{m,n}^{k-1} = U_{m,n}^k - \Delta t \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right)_{m,n}^k + \frac{1}{2} \Delta t^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right)_{m,n}^k - \frac{1}{6} \Delta t^3 \left(\frac{\partial^3 U}{\partial t^3} \right)_{m,n}^k + \cdots + O(\Delta t^4) \quad (4)$$

将式(3)与式(4)相加可得到式(5),将对式(5)推导可得到关于 t 的 2 阶中心差分格式(6)。

$$U_{m,n}^{k+1} + U_{m,n}^{k-1} = 2U_{m,n}^k + \Delta t^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right)_{m,n}^k + O(\Delta t^4) \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right)_{m,n}^k = \frac{U_{m,n}^{k+1} - 2U_{m,n}^k + U_{m,n}^{k-1}}{\Delta t^2} \quad (6)$$

基于此,可进一步推导出关于 x 、 z 的中心差分格式 (7)、(8)。

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_{m,n}^k = \frac{U_{m+1,n}^k - U_{m-1,n}^k}{2\Delta x} \quad (7)$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)_{m,n}^k = \frac{U_{m,n+1}^k - U_{m,n-1}^k}{2\Delta z} \quad (8)$$

基于式 (8) 进一步推导可得关于 z 的 2 阶中心差分格式:

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)_{m,n}^k = \frac{U_{m,n+1}^k - 2U_{m,n}^k + U_{m,n-1}^k}{\Delta z^2} \quad (9)$$

令 $\Delta x = \Delta z = h$, 基于上面得到的中心差分方程就可以求得二维波动方程的有限差分方程式 (10), 对式 (10) 进一步移向可得 2 阶波动方程的有限差分格式 (11)。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_{m,n}^k + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)_{m,n}^k &= \\ \frac{U_{m+1,n}^k - 2U_{m,n}^k + U_{m-1,n}^k}{\Delta x^2} + \frac{U_{m,n+1}^k - 2U_{m,n}^k + U_{m,n-1}^k}{\Delta z^2} &= \\ \frac{U_{m+1,n}^k - 2U_{m,n}^k + U_{m-1,n}^k + U_{m,n+1}^k - 2U_{m,n}^k + U_{m,n-1}^k}{h^2} &= \\ \frac{1}{V^2} \frac{U_{m,n+1}^{k+1} - 2U_{m,n}^k + U_{m,n-1}^{k-1}}{\Delta t^2} & \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{m,n}^{k+1} &= 2U_{m,n}^{k+1} - U_{m,n}^{k-1} + V^2 \frac{\Delta t^2}{h^2} (U_{m+1,n}^k - 2U_{m,n}^k + \\ U_{m-1,n}^k + U_{m,n+1}^k - 2U_{m,n}^k + U_{m,n-1}^k) &= 2(1 - 2B^2)U_{m,n}^k - \\ U_{m,n}^{k-1} + B^2(U_{m+1,n}^k + U_{m-1,n}^k + U_{m,n+1}^k + U_{m,n-1}^k) & \quad (11) \end{aligned}$$

利用泰勒级数继续展开式, 可以得到式 (12), 将式 (12) 与式 (3)、(4) 联立, 可得到关于 t 的 4 阶有限差分格式 (13)。

$$\begin{aligned} U_{m,n}^{k+2} &= U_{m,n}^k + (2\Delta t) \left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_{m,n}^k + \frac{1}{2}(2\Delta t)^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}\right)_{m,n}^k + \\ \frac{1}{6}(2\Delta t)^3 \left(\frac{\partial^3 U}{\partial t^3}\right)_{m,n}^k + \frac{1}{24}(2\Delta t)^4 \left(\frac{\partial^4 U}{\partial t^4}\right)_{m,n}^k &\cdots + O(\Delta t^4) \\ U_{m,n}^{k-2} &= U_{m,n}^k - (2\Delta t) \left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_{m,n}^k + \frac{1}{2}(2\Delta t)^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}\right)_{m,n}^k - \\ \frac{1}{6}(2\Delta t)^3 \left(\frac{\partial^3 U}{\partial t^3}\right)_{m,n}^k + \frac{1}{24}(2\Delta t)^4 \left(\frac{\partial^4 U}{\partial t^4}\right)_{m,n}^k &\cdots + O(\Delta t^4) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}\right)_{m,n}^k = \frac{U_{m,n}^{k+2} + 16U_{m,n}^{k+1} - 30U_{m,n}^k + 16U_{m,n}^{k-1} - U_{m,n}^{k-2}}{12\Delta t^2} \quad (13)$$

根据同样的方法分别可以得到关于 x 、 z 的 4 阶有限差分格式:

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_{m,n}^k = \frac{U_{m+2,n}^k + 16U_{m+1,n}^k - 30U_{m,n}^k + 16U_{m-1,n}^k - U_{m-2,n}^k}{12\Delta x^2} \quad (14)$$

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)_{m,n}^k = \frac{U_{m,n+2}^k + 16U_{m,n+1}^k - 30U_{m,n}^k + 16U_{m,n-1}^k - U_{m,n-2}^k}{12\Delta z^2} \quad (15)$$

在此基础上就可以推导出时间域 2 阶空间域 4 阶的波动方程有限差分方程:

$$\begin{aligned} U_{m,n}^{k+1} &= \frac{B^2}{12} [16(U_{m+1,n}^k + U_{m-1,n}^k + U_{m,n+1}^k + U_{m,n-1}^k) - \\ (U_{m+2,n}^k + U_{m-2,n}^k + U_{m,n+2}^k + U_{m,n-2}^k)] &+ \\ (2 - 5B^2)U_{m,n}^k - U_{m,n}^{k-1} & \quad (16) \end{aligned}$$

式中: $B = V \frac{\Delta t}{h}$, 其他符号意义同前。

3 矿山微震单层介质模型波场模拟

基于高阶有限差分法, 建立不同的介质模型, 分析不同介质模型下的波场特征。

3.1 均匀单层煤介质模型波场模拟

建立单一均匀煤层介质模型, P 波波速 $V_P = 1\,300$ m/s, S 波波速 $V_S = 751$ m/s, 密度 $\rho = 1\,400$ kg/m³。采用网格空间横向采样步长 $DX = 10.0$, 网格空间纵向采样步长 $DY = 10.0$, 采样时间间隔 $DT = 0.001$ s (以下各个模型都用此 DX 、 DY 、 DT 值), 网格数为 $1\,600 \times 1\,600$ 。模拟震源位置为 (0 m, 0 m) 震源 ricker 子波频率为 30 Hz。此模型在 $t = 80$ ms 时的波场快照见图 1。从图中可以看出, 在单一均匀煤介质模型中震源在中心位置, 纵横波 (P 波和 S 波) 都由中心向四周传播, P 波和 S 波的波前是一个同心圆, 纵横波都成四象限分布。

3.2 均匀单层岩介质模型波场模拟

建立单一均匀岩层介质模型, $V_P = 3\,500$ m/s, $V_S = 2\,021$ m/s, $\rho = 2\,600$ kg/m³, 网格个数 $1\,600 \times 1\,600$ 。模拟震源位置为 (0 m, 0 m), 震源 ricker 子波频率为 30 Hz。此模型在 $t = 80$ ms 时波场快照见图 2。从图中可以看出, 单层岩介质和单层煤介

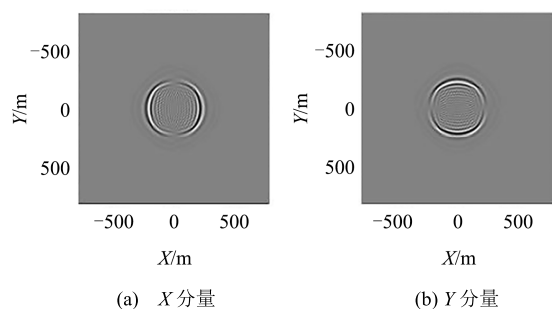


图1 单层煤介质模型波场快照

Fig.1 The snapshots of the wave field in the homogeneous medium model of the coal

质类似。同样为单一均匀模型，P波和S波都由中心向四周传播，P波和S波的波前也是一个同心圆，波成四象限分布。由于煤岩介质不同，岩层介质的速度明显大于煤层介质，在相同的传播时间下P波和S波在单一均匀岩层模型中的传播速度要明显的大于单一均匀煤层模型。基于P波波速大于S波，通过波场的动态传播过程可以很容易判断P波和S波。

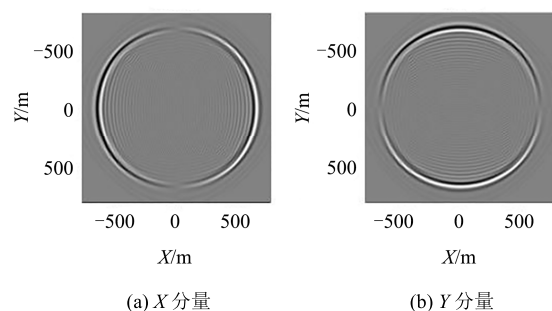


图2 单层岩介质波场快照

Fig.2 The snapshots of the wave field in the homogeneous medium model of the rock

4 组合煤岩介质模型波场模拟

4.1 双层煤岩介质模型波场模拟

4.1.1 双层煤岩介质模型 I

建立煤岩双层介质模型 I，上层（-800~100 m）为煤层， $V_P = 1\,300\text{ m/s}$ ， $V_S = 751\text{ m/s}$ ， $\rho = 1\,400\text{ kg/m}^3$ ；下层（100~800 m）为岩层， $V_P = 3\,500\text{ m/s}$ ， $V_S = 2\,021\text{ m/s}$ ， $\rho = 2\,600\text{ kg/m}^3$ ，网格数为 $1\,600 \times 1\,600$ ，模拟震源位置为(0, 0)。此时模拟震源在上部煤层，震源 ricker 子波频率为 30 Hz。此模型 I 在 $t = 80\text{ ms}$ 时的波场快照见图 3，因为波场是一个动态传播的过程，不同时刻的波场快照见图 4。从两个图中可以看出，煤岩双层介质模型 I 中，一开始 P 波和 S 波都有中间向四周传播，波到达煤岩层的分界面上时波发生反射、透射和转换，产生反射 P

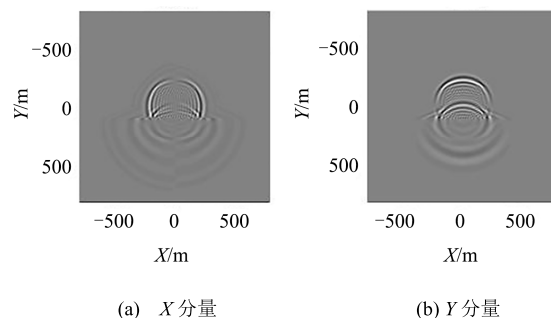


图3 煤岩双层介质模型 I (X、Y 分量)波场快照

Fig.3 The snapshots of the wave field in the two-layered medium model I of the coal and rock (X and Y components)

波 (PP1) 和反射 S 波 (SS1)、透射 P 波 (PP2) 和透射 S 波 (SS2)、反射转换波 (PS1) 和反射转换波 (SP1) 以及透射转换波 (PS1) 和透射转换波 (SP2)，由于波在下层岩层速度比上层煤层速度要大，故在下部岩层形成的透射波、透射转换波比上部煤层形成的反射波、反射转换波传播快，波在下部岩层的传播角度增大，波前变成下深上缓的不规则椭圆。过进一步观察可以看出，反射波比反射转换波要快，透射波比透射转换波快。不同时刻波场快照可以进一步形象地描述波场动态特征。

4.1.2 煤岩双层介质模型 II

建立煤岩双层介质，上层（-800~-100 m）为岩层， $V_P = 3\,500\text{ m/s}$ ， $V_S = 2\,021\text{ m/s}$ ， $\rho = 2\,600\text{ kg/m}^3$ ；下层（100~800 m）为煤层， $V_P = 1\,300\text{ m/s}$ ， $V_S = 751\text{ m/s}$ ， $\rho = 1\,400\text{ kg/m}^3$ ，网格数为 $1\,600 \times 1\,600$ ，模拟震源位置为(0, 0)。此时模拟震源在上部岩层，震源 ricker 子波频率为 30 Hz，模型 II 在 $t = 80\text{ ms}$ 时的波场快照见图 5。从图中可以看出，煤岩双层介质模型 II 与煤岩双层介质模型 I 有相似之处，但也有明显区别。一开始 P 波和 S 波都有中间向四周传播，波到达煤岩层的界面上时波同样也会发生反射，透射和转换，产生生反射 P 波 (PP1) 和反射 S 波 (SS1)、透射 P 波 (PP2) 和透射 S 波 (SS2)、反射转换波 (PS1) 和反射转换波 (SP1) 以及透射转换波 (PS1) 和透射转换波 (SP2)，但由于波在上层岩层速度比下层煤层速度要大，故下层的透射波、透射转换波比上层反射波、反射转换波传播慢，波在下部煤层的传播角度减小，波前变成下深上缓的不规则菱形。而且此模型也存在着同样的规律，反射波比反射转换波要快，透射波比透射转换波要快。

4.2 3 层煤岩介质模型波场模拟

4.2.1 3 层煤岩介质模型 I

建立 3 层介质模型 I，上层（-800~-100 m）

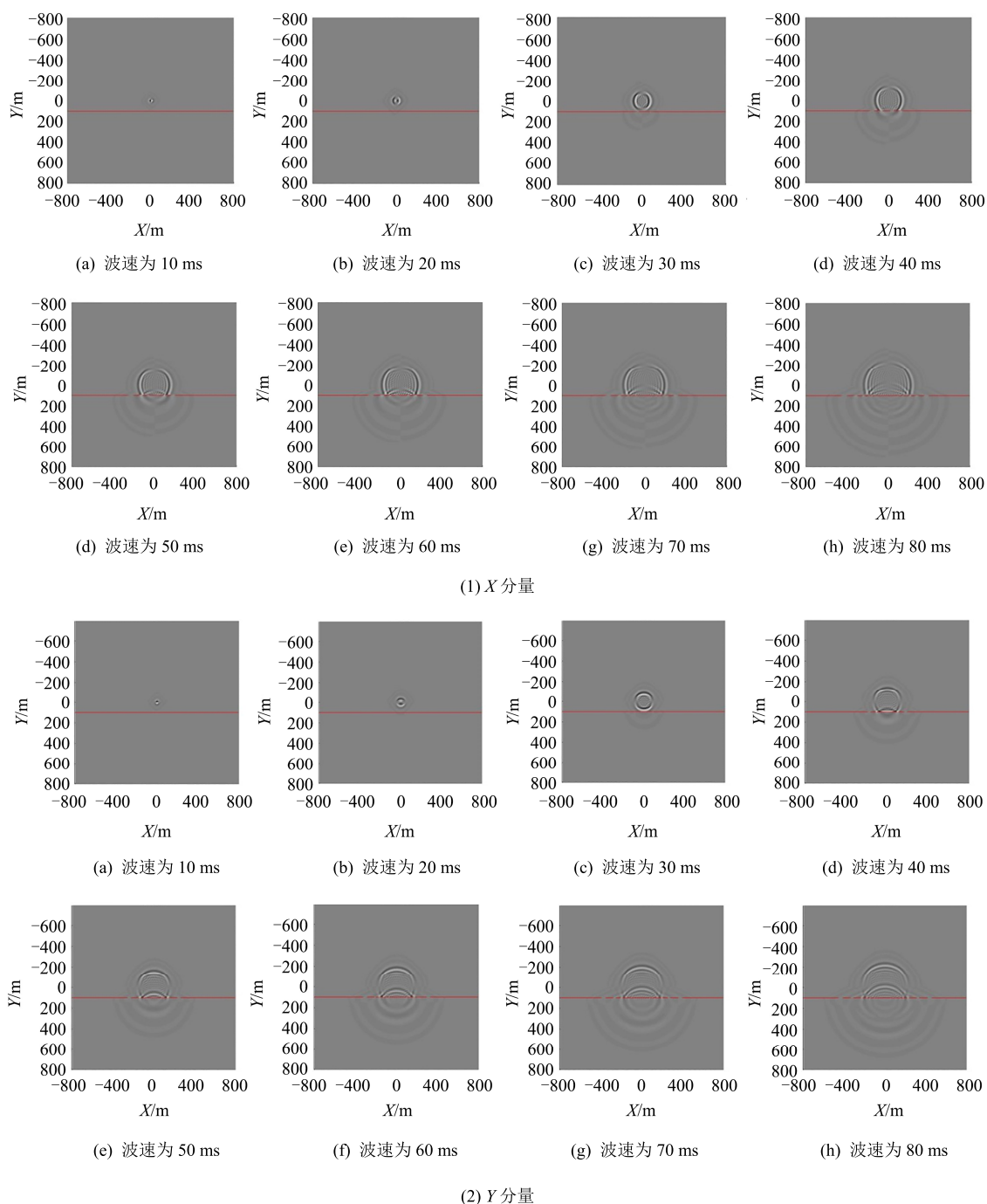


图 4 煤岩双层介质模型 I 不同时刻波场快照

Fig.4 The snapshots of the wave field at different time for the two-layered medium model I of the coal and rock

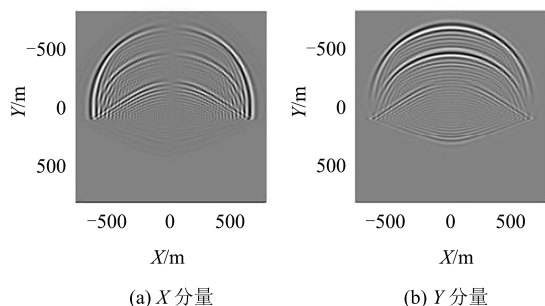


图 5 双层煤岩介质模型 II 波场快照

Fig.5 The snapshots of the wave field in the two-layered medium model II of the coal and rock

为岩层, $V_P = 2\,500\text{ m/s}$, $V_S = 1\,445\text{ m/s}$, $\rho = 1\,800\text{ kg/m}^3$; 中层 ($-100 \sim 100\text{ m}$) 为煤层, $V_P = 1\,300\text{ m/s}$, $V_S = 751\text{ m/s}$, $\rho = 1\,400\text{ kg/m}^3$; 下层 ($100 \sim 800\text{ m}$) 为岩层, $V_P = 3\,500\text{ m/s}$, $V_S = 2\,021\text{ m/s}$, $\rho = 2\,600\text{ kg/m}^3$ 网格数为 $1\,600 \times 1\,600$, 模拟震源位置为 $(0, 0)$, 震源在中部煤层, 震源 ricker 子波频率为 30 Hz , 模型 I 在 $t = 80\text{ ms}$ 时波场快照见图 6。从图中可以看出, 一开始 P 波和 S 波都有中间向四周传播, 但由于 3 层介质模型 I 的震源位置在中间的煤层, 在上下煤岩层的分界面上, 波前都会产生生反射 P 波

(PP1) 和反射 S 波 (SS1)、透射 P 波 (PP2) 和透射 S 波 (SS2)、反射转换波 (PS1) 和反射转换波 (SP1) 以及透射转换波 (PS1) 和透射转换波 (SP2), 而且由于波在上下岩层的速度都比中间煤层的速度大, 波在上下岩层的传播角度都增大, 故透射波、透射转换波比反射波、反射转换波传播快, 波前变成下深上缓的不规则椭圆, 但由于波在下岩层速度比上层速度要大, 波在下部岩层的传播角度比上部岩层的大, 所以下岩层波形成的不规则椭圆大于上岩层的椭圆, 而且此模型也存在着同样的规律, 反射波比反射转换波要快, 透射波比透射转换波要快。

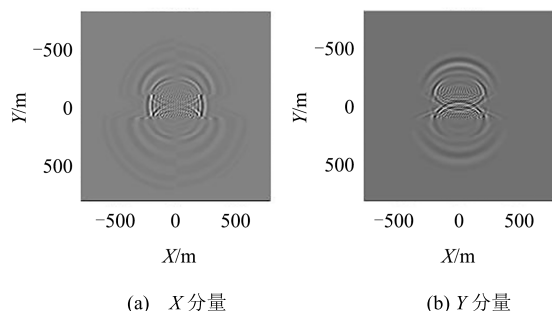


图 6 煤岩 3 层介质模型 I 波场快照

Fig.6 The snapshots of the wave field in the three-layered medium model I of the coal and rock

4.2.2 煤岩 3 层介质模型 II

建立煤岩 3 层介质模型 II, 上层 (-800~-100 m) 为岩层, $V_P = 2\,500\text{ m/s}$, $V_S = 1\,445\text{ m/s}$, $\rho = 1\,800\text{ kg/m}^3$; 中层 (-100~0 m) 为煤层, $V_P = 1\,300\text{ m/s}$, $V_S = 751\text{ m/s}$, $\rho = 1\,400\text{ kg/m}^3$; 下层 (0~800 m) 为岩层, $V_P = 3\,500\text{ m/s}$, $V_S = 2\,021\text{ m/s}$, $\rho = 2\,600\text{ kg/m}^3$, 网格数为 $1\,600 \times 1\,600$, 模拟震源位置为 (0, -200)。此时模拟震源在上部岩层, 震源 ricker 子波频率为 30 Hz。此模型 II 在 $t = 80\text{ ms}$ 时的波场快照见图 7, 不同时刻的波场快照见图 8。从图 8 中可以看出, 一开始 P 波和 S 波都有中间向四周传播, 但由于模型 II 震源位置在上部的煤层, 从上往下传播的过程中会经过两个煤岩分层界面, 在经过两个分层界面时, 波都会产生反射 P 波 (PP1) 和反射 S 波 (SS1)、透射 P 波 (PP2) 和透射 S 波 (SS2)、反射转换波 (PS1) 和反射转换波 (SP1) 以及透射转换波 (PS1) 和透射转换波 (SP2)。在经过第一个分层界面时, 由于波在中层煤层的速度比上层岩的速度要小, 故透射波、透射转换波比反射波、反射转换波传播慢, 波在中部岩层的传播角度增减小, 波前变成下深上缓的不规则菱形; 紧接着透射波再经过第二个反射界面, 波在下层岩的速度比中层煤

的速度大, 故透射波、透射转换波比反射波、反射转换波传播快, 波在下部岩层的传播角度又增大, 波前变成下深上缓的不规则椭圆, 但由于波在经过煤层后发生了大幅度的衰减, 故产生的不规则椭圆比较小。而且此模型也存在着同样的规律, 反射波比反射转换波要快, 透射波比透射转换波要快。不同时刻波场快照可以进一步形象地描述波场动态特征。

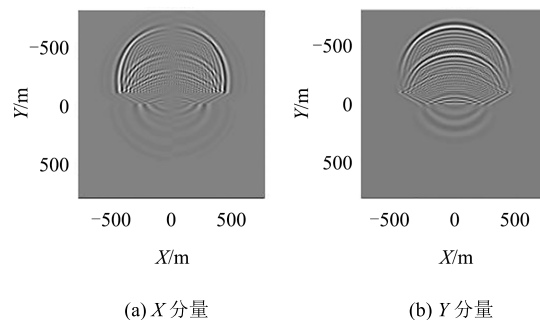


图 7 煤岩 3 层介质模型 II 波场快照

Fig.7 The snapshots of the wave field in the three-layered medium model II of the coal and rock

5 复杂模型

5.1 含断层介质模型波场模拟

建立含断层介质模型, 断层模型由两种岩层组成, 岩层 1: $V_P = 2\,500\text{ m/s}$, $V_S = 1\,445\text{ m/s}$, $\rho = 1\,800\text{ kg/m}^3$; 岩层 2: $V_P = 3\,500\text{ m/s}$, $V_S = 2\,021\text{ m/s}$, $\rho = 2\,600\text{ kg/m}^3$, 断层交界点在 (100, 100) 处, 网格数为 $1\,600 \times 1\,600$, 模拟震源位置为 (0, -200), 此时模拟震源在岩层 1, 震源 ricker 子波频率为 30 Hz, 此模型的在 $t = 80\text{ ms}$ 时的波场快照见图 9, 不同时刻的波场快照见图 10。从两个图中可以看出, 在煤岩断层模型中可以观察到更加丰富的波场特征, 波开始也是从中间向四周传播, 但在断层界面上时, 波前会产生反射 P 波 (PP1) 和反射 S 波 (SS1)、透射 P 波 (PP2) 和透射 S 波 (SS2)、反射转换波 (PS1) 和反射转换波 (SP1) 以及透射转换波 (PS1) 和透射转换波 (SP2)。除了产生的这些波以外还可以观察到在断层的交界点会形成一个新的震源, 产生折射波和绕射波继续向空间传播。折射波和绕射波在上层和下层都存在。从图中可以看出, 此模型层中的反射波与绕射波是相互连接的, 找到其中一种波就可以找到另外一种波, 不同时刻波场快照可以进一步形象地描述波场动态特征。

5.2 含水煤岩双相介质模型波场模拟

建立双相各向同性介质模型。网格个数为 $400 \times$

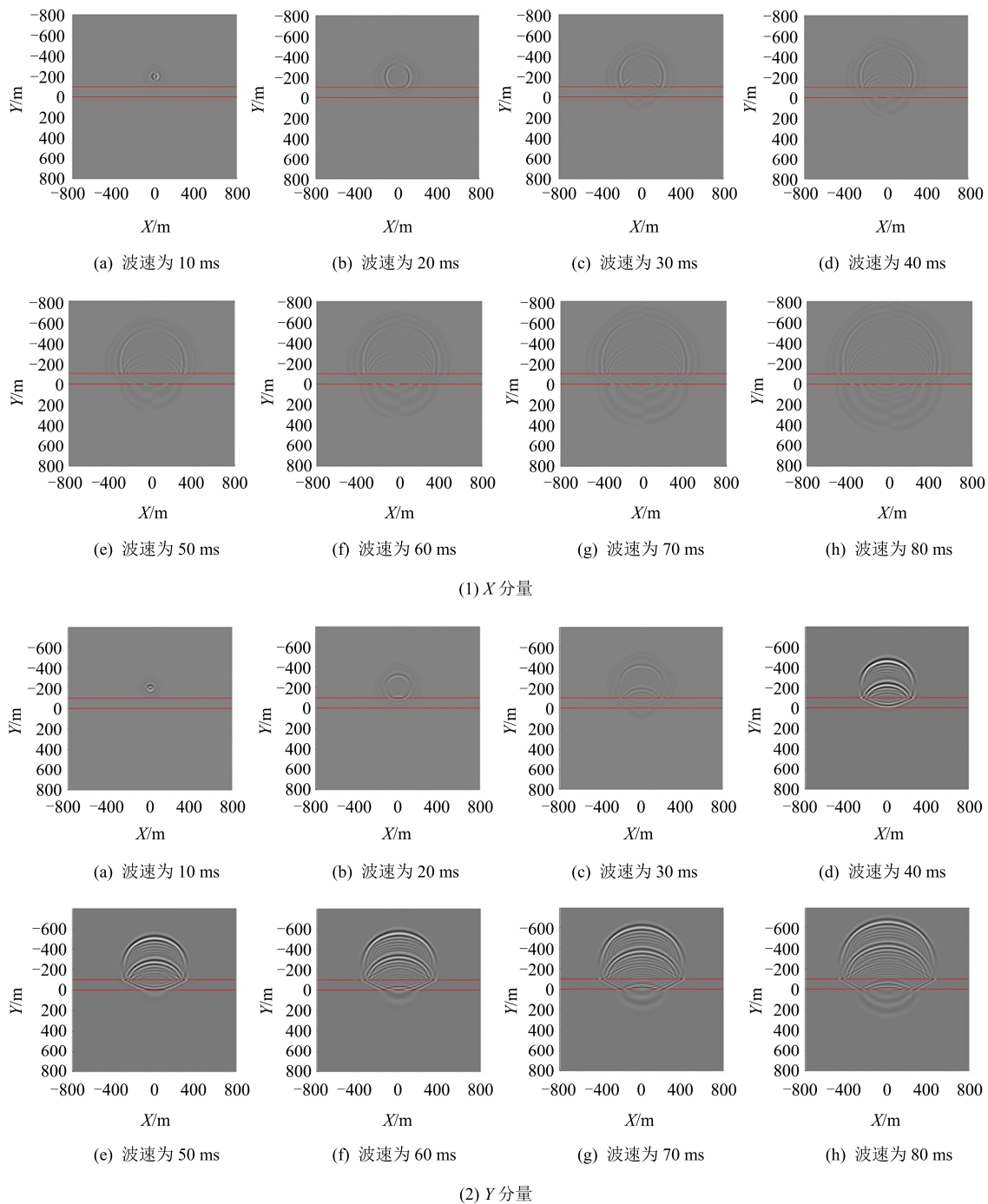


图 8 3 层煤岩介质模型 II 不同时刻波场快照

Fig.8 The snapshots of the wave field at different time for the three-layered medium model II of the coal and rock

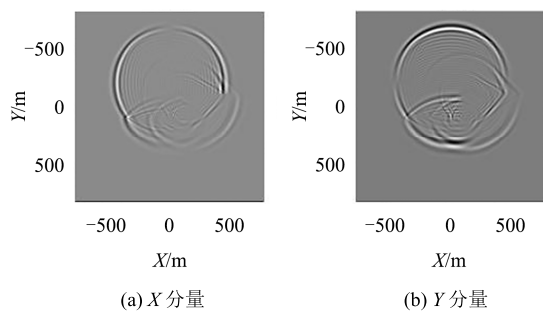


图 9 含断层介质模型波场快照

Fig.9 The snapshots of the wave field in the fault-bearing medium model

400, 震源位置在(200, 200)处, 震源雷克子波频率为 30 Hz。建立煤和水双相介质模型 I 以及岩和水双相介质模型 II, 两种双相介质的参数见表 1。表中, A 为弹性波理论中的 Lamé 系数; λ 、 N 为弹性波理论中的 Lamé 系数; μ 、 R 为对为保持体积元总体积不变施于流体上的一种作用力的刻画; Q 为固体与流体之间的耦合系数 ($10^9 \text{ kg/m} \cdot \text{s}^2$); ρ_{ij} 为密度 (10^3 kg/m^3); b 为耗散系数 ($\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$)。双相介质模型在 $t = 80 \text{ ms}$ 时的波场快照见图 11。

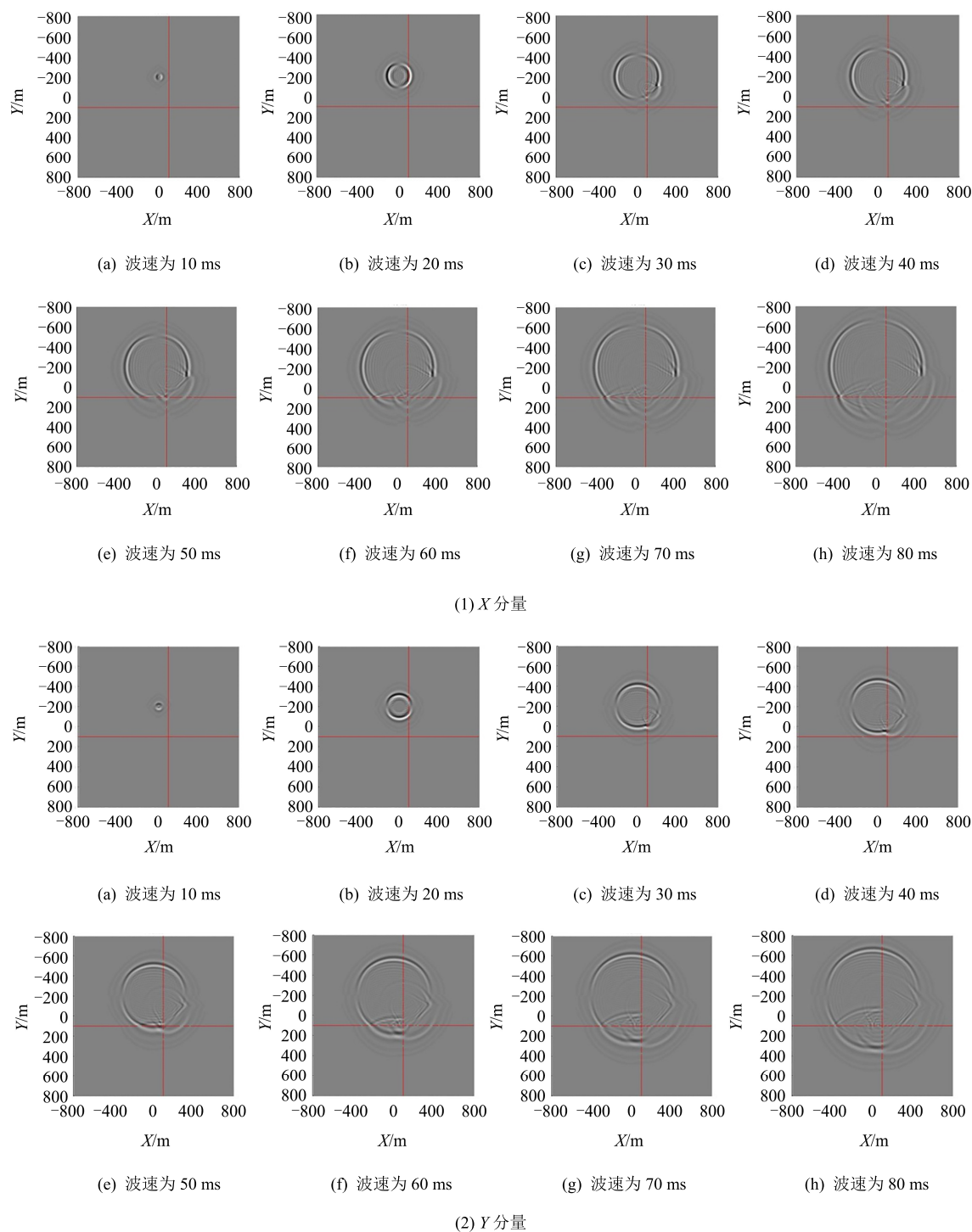


图 10 含断层介质模型不同时刻波场快照

Fig.10 The snapshots of the wave field at different time for the fault-bearing medium model

表 1 双相介质模型参数

Table 1 Parameters in the two-phase media model

模型	固相系数		液相系数		耦合系数		耗散系数
	A	N	ρ_{11}	R	ρ_{22}	Q	ρ_{12}
I	12.72	6.84	1.40	0.331	0.98	0.953	-0.083
II	12.72	6.84	2.60	0.331	0.98	0.953	-0.083

从图 11 中可以看出,震源在双相介质中激发了

3 种类型的波,从外向内分别为快纵(P)波、横(S)波和慢纵(P)波,快纵(P)波和横(S)波类似于单相介质中的纵波和横波。慢纵(P)波传播很慢,而且快纵(P)波和横(S)波在流相介质中非常不明显。由于岩层的速度明显大于煤层,所以在岩水双相介质中快纵(P)波和横(S)波的传播速度明显大于在煤水双相介质中,但慢纵(P)波几乎没有什么区别。

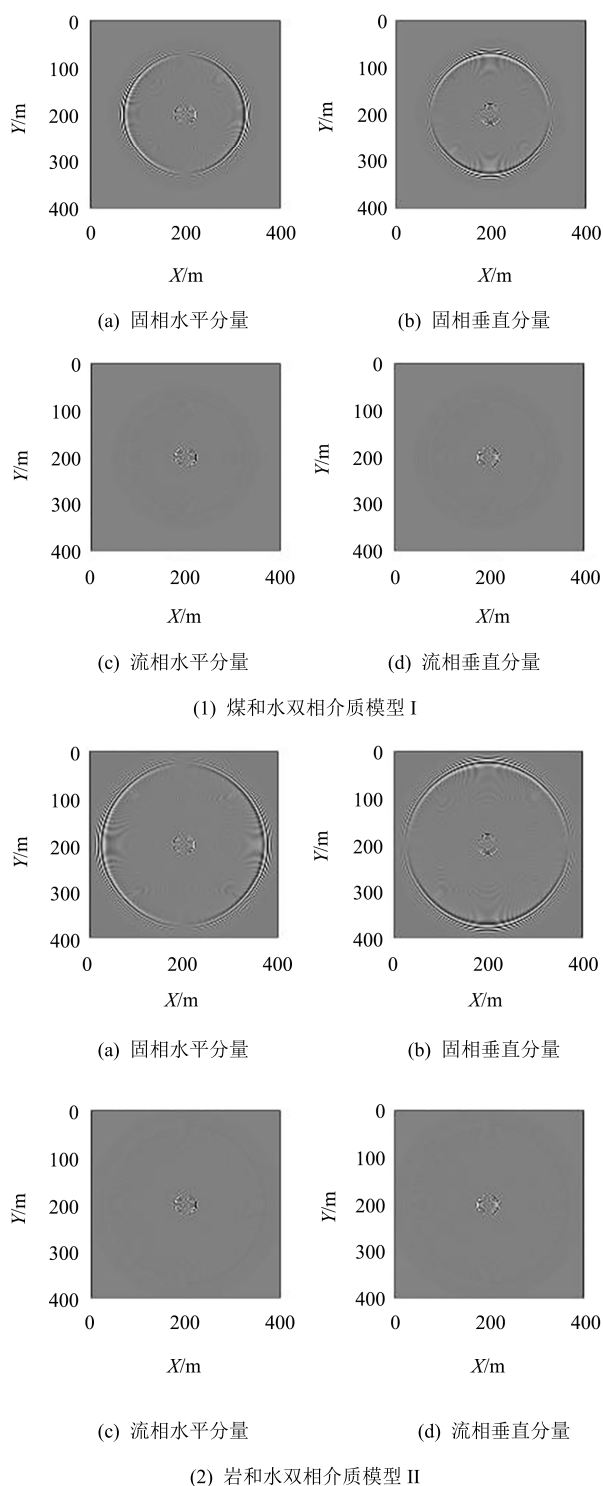


图 11 双相介质模型 X 分量和 Y 分量波场快照
Fig.11 The snapshots of the wave field in the two-phase medium model for the X - and Y -component

6 结 论

(1) 煤岩单层介质模型的 P 波和 S 波的传播基本一致, 只是速度不同。多层介质中一开始波由中间向四周传播, 但在煤岩介质的分层处波都会发生反射和转换, 产生反射波、透射波、反射转换波和透射转换波, 由于不同煤岩介质的波速不同, 经过

反射透射后产生的波场的形状也不同。在经过介质分层时, 当波进入的介质层的速度大于上一介质层的速度时, 产生的透射波、透射转换波要比反射波、反射转换波传播快, 波的传播角度增大, 波前变成下深上缓的不规则椭圆。当波进入的介质层的速度小于上一介质层的速度时, 产生的透射波、透射转换波要比反射波、反射转换波传播慢, 波的传播角度减小, 波前变成下深上缓的不规则菱形。但在所有介质中, 都存在着反射波比反射转换波要快, 透射波比透射转换波要快的规律。

(2) 在含断层复杂介质中可以观察到更加丰富的波场特征, 在煤岩断层界面除了会产生反射波、反射转换波、透射波和透射转换波外, 在断层交界点形成一个新的震源, 可以产生折射波和绕射波继续向空间传播。折射波和绕射波在两层中都存在, 此模型层中的反射波与绕射波是相互连接的, 找到其中一种波就可以找到另外一种波。不同时刻波场快照可以进一步形象地描述波场动态特征。

(3) 震源在双相介质中激发了 3 种类型的波, 从外向内分别为快纵波、横波和慢纵波, 快纵波和横波类似于单相介质中的纵波和横波。慢纵波传播速度明显小于快纵波和横波, 而且快纵波在流相介质中不明显。由于岩层的速度大于煤层, 在岩水双相介质中快纵波和横波的传播速度大于在煤水双相介质中, 但慢纵波几乎没有什么区别。

参 考 文 献

- [1] 何学秋, 窦林名, 牟宗龙, 等. 煤岩冲击动力灾害连续监测预警理论与技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1485—1491.
HE Xue-qiu, DOU Lin-ming, MOU Zong-long, et al. Continuous monitoring and warning theory and technology of rockburst dynamic disaster of coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1485—1491.
- [2] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205—213.
JIANG Yao-dong, PAN Yi-shan, JIANG Fu-xing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(2): 205—213.
- [3] 张永刚. 地震波场数值模拟方法[J]. 石油物探, 2003, 42(2): 143—148.
ZHANG Yong-gang. On numerical simulations of seismic wavefield[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*,

- 2003, 42(2): 143—148.
- [4] 冯英杰, 杨长春, 吴萍. 地震波有限差分模拟综述[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 487—491.
FENG Chang-ying, YANG Chang-chun, WU Ping. The review of the finite-difference elastic wave motion modeling[J]. **Progress in Geophysics**, 2007, 22(2): 487—491.
- [5] 李信富, 李小凡, 张美根. 地震波数值模拟方法研究综述[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(2): 241—248.
LI Xin-fu, LI Xiao-fan, ZHANG Mei-gen. Summary of seismic wave numerical simulation method[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2007, 27(2): 241—248.
- [6] ALTERMAN. Propagation of elastic wave in layered media by finite difference methods[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1968, 58(1): 367—398.
- [7] KELLY. Synthetic seismograms — A finite difference approach[J]. **Geophysics**, 1976 141: 2—27.
- [8] VIRIEUX J m. SH-wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference[J]. **Geophysics**, 1984, 49(11): 1933—1957.
- [9] 李国平, 姚逢昌, 石玉梅, 等. 有限差分法地震波数值模拟的几个关键问题[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(2): 469—476.
LI Guo-ping, YAO Feng-chang, SHI Yu-mei, et al. Several key issues of finite-difference seismic wave numerical simulation[J]. **Progress in Geophysics**, 2011, 26(2): 469—476.
- [10] 刘洪林, 陈可洋, 杨微, 等. 高阶交错网格有限差分法纵横波波场分离数值模拟[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 877—884.
LIU Hong-lin, CHEN Ke-yang, YANG Wei, et al. Numerical modeling of the P- and S-wave field separation with high-order staggered-grid finite-difference scheme[J]. **Progress in Geophysics**, 2010, 25(3): 877—884.
- [11] 李景叶, 陈小宏. 横向各向同性介质地震波场数值模拟研究[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(3): 700—705.
LI Jing-ye, CHEN Xiao-hong. Study on seismic wave field numerical simulation in transverse isotropic medium[J]. **Progress in Geophysics**, 2006, 21(3): 700—705.
- [12] 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 Bing-jie, LI Xiao-fan, XU Tian-ji. Numerical modeling of the seismic wave-field in cracked media with liquid[J]. **Progress in Geophysics**, 2007, 22(5): 1370—1374.
- [13] 喻振华, 冯德山. 黏弹性介质中跨孔波场的交错网格有限差分法正演模拟[J]. 物探化探计算技术, 2008, 30(4): 273—277, 261.
YU Zhen-hua, FENG De-shan. Finite difference finite difference method for forward modeling of transaxial pore wave in viscoelastic media with staggered grid[J]. **Geophysical and Geochemical Calculation Technology**, 2008, 30(4): 273—277, 261.
- [14] 祝贺君, 张伟, 陈晓非. 二维各向异性介质中地震波场的高阶同位网格有限差分模拟[J]. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1536—1546.
ZHU He-jun, ZHANG Wei, CHEN Xiao-fei. Two-dimensional seismic wave simulation in anisotropic media by non-staggered finite difference method[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2009, 52(6): 1536—1546.
- [15] 何彦锋, 孙伟家, 符力耘. 复杂介质地震波传播模拟中边界元法与有限差分法的比较研究[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 664—678.
HE Yan-feng, SUN Wei-jia, FU Li-geng. Comparison of boundary element method and finite-difference method for simulating seismic wave propagation in complex media[J]. **Progress in Geophysics**, 2013, 28(2): 664—678.
- [16] 王涛, 白超英, 杨尚倍. 各向同性介质中射线理论与有限差分地震波场模拟方法比较研究[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(2): 606—613.
WANG Tao, BAI Chao-ying, YANG Shang-bei. Comparison of ray theory and FDM for simulating seismic wavefield in isotropic media[J]. **Progress in Geophysics**, 2016, 31(2): 606—613.
- [17] 薛东川, 王尚旭, 焦淑静. 起伏地表复杂介质波动方程有限元数值模拟方法[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 522—529.
XUE Dong-chuan, WANG Shang-xu, JIAO Shu-jing. Wave equation finite-element modeling including rugged topography and complicated medium[J]. **Progress in Geophysics**, 2007, 22(2): 522—529.