

基于隧道空间全波场二维数值模拟与特征分析

刘江平¹, 程 飞¹, 范承余², 曹 进²

(1. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074; 2. 安徽省高速公路控股集团有限公司, 安徽 合肥 230051)

摘要: 基于隧道地震波场二维数值模拟是研究隧道超前探测过程中地震波传播规律的基础, 目前关于方面的研究均建立在隧道侧壁观测系统的基础上, 并且把隧道空间作为与周围地层具有同样弹性参数的均匀介质考虑, 因此不能实现全波场模拟, 与实际存在差异。基于实际隧道空间, 建立了更加接近实际的隧道地质模型, 实现了隧道空间的二维全波场模拟。通过二维全波场模拟及实例结果对比分析表明: ①采用空间四阶时间二阶交错网格有限差分法能有效实现基于隧道空气介质的二维全波场模拟; ②当地质界面倾角为90°时, 掌子面附近激发的共激发点观测系统比侧壁的共接收点观测系统更有利于反射波的获取; ③随着地质界面倾角的减小, 界面同侧激发和接收的反射波能量增强; ④对于局部地质体和大倾角地质界面, 掌子面附近激发横波能量强于纵波, 有利于横波成像。

关键词: 全波场模拟; 隧道; 超前预报; 交错网格

中图分类号: U45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)09-1705-07

作者简介: 刘江平(1957-), 男, 湖南双峰人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境工程地球物理方面的教学和研究工作。E-mail: liujp_geop@126.com。

Two-dimensional numerical simulation of tunnel-based seismic full-wave fields

LIU Jiang-ping¹, CHENG Fei¹, FAN Cheng-yu², CAO Jin²

(1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. Anhui Expressway Holding Group Company Limited, Hefei 230051, China)

Abstract: The two-dimensional (2D) numerical simulation of seismic wave fields based on tunnels is a basis for the analysis of propagation laws of seismic waves in the tunnel prediction. All of the current researches, which are designed with observation systems on the sidewalls of tunnels and assume tunnels as homogeneous media with the same elastic parameters of surrounding media, are not in conformity with the actual situations because they cannot involve surface waves. A geological tunnel-based model is established, which is more suitable for the practical tunnels to achieve the 2D numerical simulation of seismic full-wave fields. The results show: (1) using a staggered grid finite-difference (FD) algorithm with a second-order accuracy in time and a fourth-order accuracy in space, we can achieve the 2D numerical simulation of seismic full-wave fields without ignoring the air medium in tunnels; (2) when considering a vertical geological interface, common-source system with shots near the tunnel face is better for obtaining reflection waves than the one with shots on the side walls; (3) with the decrease of the dips of geological interfaces, the energy of reflection waves increases when shots and receivers are on the same side; (4) for the local geological features and interfaces, shear wave shot on the tunnel face, which acquires more energy than pressure wave shot, can help in shear wave imaging.

Key words: numerical simulation of full-wave fields; tunnel; advanced forecast; staggered-grid

0 引言

隧道工程作为一项隐蔽性工程, 在修建过程中, 前方存在很多未知的地质条件, 例如断层、溶洞、暗河、松散地质体等, 它们成因复杂且具有突发性。如果在掘进的过程中不能准确预报掌子面前方的地质情况, 则会发生岩爆、断裂带涌水、围岩失稳等隧道地质灾害, 轻则耽误施工进度、破坏器械设备, 重则造成人员伤亡, 给施工单位、国家和人民带来严重的损

失。隧道地质超前预报因要求高、技术难度大而成为一个国际前沿课题及难题^[1]。目前在超前预报的方法中, 利用反射地震波方法进行超前预报是主要的, 也是准确率最高的一类地球物理探测方法, 包括TSP系统、负视速度法、隧道垂直地震剖面法、水平声波剖面法、陆地声纳法及隧道地震层析成像法等^[2-3]。由于隧道超前预报的特点决定了现场工作必须在狭小的隧

道施工现场实时完成，并且还必须满足狭小场地条件下进行大距离、高精度、高效率探测的要求。而隧道中纵波、横波、面波、直达波、反射波、转换波等使得地震记录相对复杂，因此需要从根本上弄清在隧道空间中地震波的传播的机理与特性。

基于隧道的地震波场二维数值模拟是认识隧道超前预报过程中地震波的传播规律，以及给实际观测系统的设计、数据的采集、资料的处理与解释提供重要依据的基础。近年来一些学者做了这方面的研究^[3-8]，王齐仁基于层状地质模型和侧壁观测法的基本原理，推导并研究了多层介质反射波时距曲线的特点，杜立志分别对不同地质界面倾角的二层和三层介质进行波场模拟，并对波场特征进行了分析，但两者均未将隧道作为空气介质考虑，与实际存在差异；鲁光银将隧道用自由边界处理对不同地质界面进行了正演模拟，但未进行面波的模拟。

因此，本文针对上述情况，将隧道作为空气介质建立地质模型，加入吸收边界条件，采用空间四阶时间二阶交错网格有限差分法，实现了隧道空间的全波场二维模拟；进行了不同界面倾角和局部地质体的全波场模拟及波场特征分析，以及基于实际资料的全波场模拟与对比分析，为实际隧道超前预报观测系统的设计和理论研究提供基础与依据。

1 波动方程及其有限差分格式

在各向同性介质中，二维弹性波波动方程为

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z}, \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中， u, w 表示 X, Z 方向的位移， λ 和 μ 为拉梅常数， ρ 为介质的密度。令 v_x, v_z 表示 x, z 方向的速度， τ_{xx}, τ_{zz} 表示 x, z 方向的正应力， τ_{xz} 表示切应力，则可将 (1) 式降阶，得到弹性波一阶速度-应力方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z}, \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial t} &= \mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial t} &= \lambda \frac{\partial v_x}{\partial z} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_z}{\partial z}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在数值模拟过程中，采用交错网格^[9]对方程 (2)

进行离散，得到二维各向同性介质中弹性波传播的交错网格任意偶数阶差分格式：

$$\left. \begin{aligned} U_{i,j}^{k+1/2} &= U_{i,j}^{k-1/2} + \frac{\Delta t}{\rho} \left\{ \frac{1}{\Delta x} \sum_{n=1}^N C_n^N [P_{i+(2n-1)/2,j}^k - P_{i-(2n-1)/2,j}^k] + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \frac{1}{\Delta z} \sum_{n=1}^N C_n^N [R_{i,j+(2n-1)/2}^k - R_{i,j-(2n-1)/2}^k] \right\}, \\ V_{i+1/2,j+1/2}^{k+1/2} &= V_{i+1/2,j+1/2}^{k-1/2} + \frac{\Delta t}{\rho} \left\{ \frac{1}{\Delta x} \sum_{n=1}^N C_n^N [R_{i+n,j+1/2}^k - R_{i-(n-1),j+1/2}^k] + \right. \\ &\quad \left. \left. \frac{1}{\Delta z} \sum_{n=1}^N C_n^N [Q_{i+1/2,j+n}^k - Q_{i+1/2,j-(n-1)}^k] \right\}, \\ P_{i+1/2,j}^{k+1} &= P_{i+1/2,j}^k + \left\{ (\lambda_{i+1/2,j} + 2\mu_{i+1/2,j}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \sum_{n=1}^N C_n^N [U_{i+n,j}^{k+1/2} - \right. \\ &\quad \left. U_{i-(n-1),j}^{k+1/2}] + \lambda_{i+1/2,j} \frac{\Delta t}{\Delta z} \sum_{n=1}^N C_n^N [V_{i+1/2,j+(2n-1)/2}^{k+1/2} - V_{i+1/2,j-(2n-1)/2}^{k+1/2}] \right\}, \\ Q_{i+1/2,j}^{k+1} &= Q_{i+1/2,j}^k + \left\{ \lambda_{i+1/2,j} \frac{\Delta t}{\Delta x} \sum_{n=1}^N C_n^N [U_{i+n,j}^{k+1/2} - U_{i-(n-1),j}^{k+1/2}] + \right. \\ &\quad \left. (\lambda_{i+1/2,j} + 2\mu_{i+1/2,j}) \frac{\Delta t}{\Delta z} \sum_{n=1}^N C_n^N [V_{i+1/2,j+(2n-1)/2}^{k+1/2} - V_{i+1/2,j-(2n-1)/2}^{k+1/2}] \right\}, \\ R_{i+1/2,j}^{k+1} &= R_{i+1/2,j}^k + \left\{ \mu_{i,j+1/2} \frac{\Delta t}{\Delta x} \sum_{n=1}^N C_n^N [U_{i,j+n}^{k+1/2} - U_{i,j-(n-1)}^{k+1/2}] + \right. \\ &\quad \left. \mu_{i,j+1/2} \frac{\Delta t}{\Delta z} \sum_{n=1}^N C_n^N [V_{i+(2n-1)/2,j+1/2}^{k+1/2} - V_{i-(2n-1)/2,j+1/2}^{k+1/2}] \right\}, \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

式中， Δx 和 Δz 分别为 X 和 Z 轴方向的空间采样间隔， Δt 为时间采样间隔， U 和 V 分别代表速度分量 v_x 和 v_z 的离散值， P, Q 和 R 分别代表应力 τ_{xx}, τ_{zz} 和 τ_{xz} 的离散值，本文模拟时采用空间四阶精度，时间二阶精度的格式。

2 边界条件

在边界条件处理上，模型的上下左右的边界均采用吸收边界条件^[10]，即在一定的带状区域内，应力和质点速度应乘以特定的因子 G ，吸收边界示意图如图 1 所示。吸收因子表达式见式 (4)，其中 N 为吸收边界网格数：

$$G = \exp[-(0.305/N) \times (N - i)^2] \quad (0 \leq i \leq N) \quad (4)$$

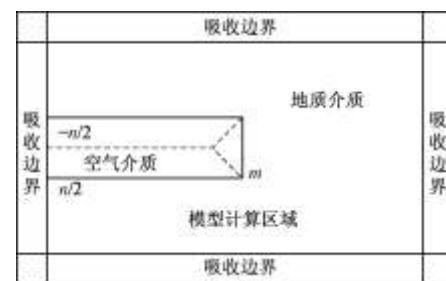


图 1 吸收边界示意图

Fig. 1 Diagram of absorbing boundary

对于隧道空间同样也采用吸收边界处理，若设隧

道长度网模型格数为 m , 隧道宽度模型网格数为 n ,

$$G = \begin{cases} \exp\left[-\left(3.05/\left(\frac{n}{2}\right)\right) \times \left(\frac{n}{2} + z\right)^2\right] & \left(-\frac{n}{2} \leq z \leq 0, \quad 0 \leq x \leq m - \frac{n}{2} - j\right) \\ \exp\left[-\left(3.05/\left(\frac{n}{2}\right)\right) \times \left(\frac{n}{2} - z\right)^2\right] & \left(0 < z \leq \frac{n}{2}, \quad 0 \leq x \leq m - \frac{n}{2} + j\right) \\ \exp\left[-\left(3.05/\left(\frac{n}{2}\right)\right) \times (m - x)^2\right] & \left(m - \frac{n}{2} \leq x \leq m, \quad -\left(i - m + \frac{n}{2}\right) \leq z \leq i - m + \frac{n}{2}\right) \end{cases} \quad (5)$$

3 地质模型及观测系统的设计

为了验证上述数值模拟方法的正确性以及不同地质体的波场特征及变化规律, 本文建立了以下地质模型(图 2), 模型 I - 1 是为了研究大倾角(界面与隧道轴线所成夹角)地质界面的波场特征而建立的界面倾角为 90° 的两层地质模型; 为了分析随着界面倾角变化波场的变化规律, 设计了界面倾角 60° 和 30° 的两个地质模型(模型 I - 2、模型 I - 3), 3 个模型中掌子面的法向深度均为 75 m。模型 II 是为了解对局部地质体的分辨能力而设计的溶洞地质模型, 溶洞位于掌子面正前方, 溶洞中心距掌子面 77 m, 半径为 2 m。模型的速度参数见表 1。

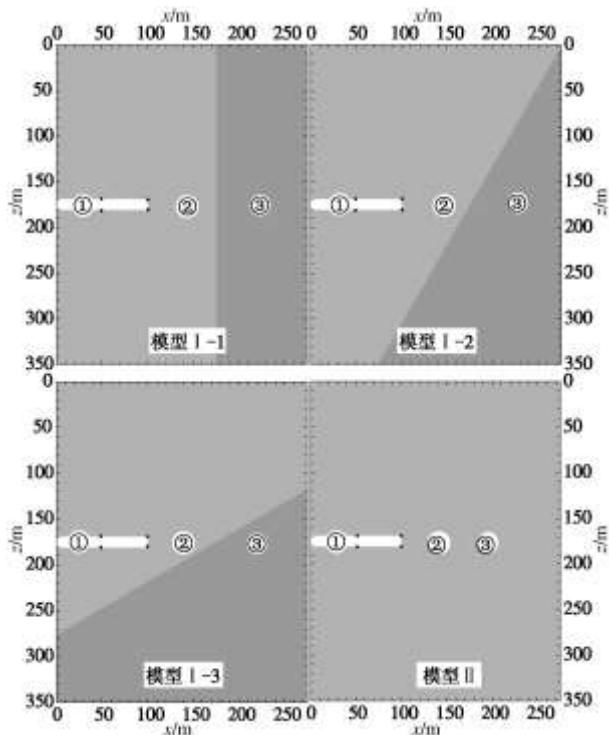


图 2 地质模型

Fig. 2 Geological models

数值模拟采用的观测系统如图 3 所示, 隧道空间大小的设计和实际相符, 宽度为 12 m, 长度 100 m, 每个模型均有四个激发点, 第 1, 4 激发点分别位于隧道的两侧壁, 偏移距 16 m; 第 2, 3 激发点位于掌子

则隧道空间中不同区域的衰减因子为

面和侧壁的交点处。隧道两侧壁接收点数均为 35 个,

掌子面上 13 个, 接收点按逆时针排序, 共计 83 道, 道间距为 1.0 m; 炮点和接收点埋深均为 1.5 m。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

层序号	物性参数	模型 I - 1	模型 I - 2	模型 I - 3	模型 II
	$V_p/(m s^{-1})$	340.0	340.0	340.0	340.0
①	$V_s/(m s^{-1})$	0.0	0.0	0.0	0.0
	$\rho/(kg m^{-3})$	100.0	100.0	100.0	100.0
	$V_p/(m s^{-1})$	2000.0	2000.0	2000.0	2000.0
②	$V_s/(m s^{-1})$	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
	$\rho/(kg m^{-3})$	1800.0	1800.0	1800.0	1800.0
	$V_p/(m s^{-1})$	2500.0	2500.0	2500.0	1500.0
③	$V_s/(m s^{-1})$	1350.0	1350.0	1350.0	500.0
	$\rho/(kg m^{-3})$	2000.0	2000.0	2000.0	1500.0



图 3 观测系统示意图

Fig. 3 Diagram of observation system

4 理论模拟与分析

运用上述的差分格式及边界条件, 针对设计的四个模型使用 FORTRAN 语言实现了全波场模拟, 其中模型大小为 275 m × 350 m, 网格间距 $\Delta x = \Delta z = 0.25$ m, 采样间隔为 0.01 ms, 记录长度 250 ms, 震源采用 Ricker 子波, 频率为 200 Hz。为了能够直观地分析波场的传播情况, 选取模型 I - 2 的第二炮记录在时间 $t=25, 50, 75, 100$ ms 时的波场快照进行分析。

由图 4 可见, 在 25 ms 时, 由于没有遇到界面, 只有直达纵波(P)、横波(S)和面波(R); 在 50 ms 时, 界面处已产生反射纵波(PP)和透射纵波(TP), 并且有转换横波出现; 在 75 ms 时, 可明显看到由纵波产生的反射转换横波(PS)、透射转换横波(TPS)和透射横波(TS); 在 100 ms 时, 波场变得更加复杂,

除纵波产生的反射、透射和转换波外, 也存在反射横波 (SS) 和透射横波, 但由横波产生的转换纵波不明

显; 各波的运动学和动力特征满足波场规律, 证明了模拟结果的正确性。

4.1 模型 I 的模拟结果与分析

图 5~10 为模型 I 不同倾角的水平分量 (X) 和垂直分量 (Z) 模拟记录, (a)、(b)、(c)、(d) 分别为一至四炮记录。

模型 I-1 的模拟记录如图 5、6 所示, 由图可见, 直达波 (P)、面波 (R)、反射纵波 (PP)、反射转换横波 (PS) 和反射横波 (SS) 能量突出, 且存在隧道掌子面物性突变点的直达波和面波的绕射波。由记录可知 P 波和 R 波的视速度分别约为 1978 m/s 和 938 m/s, PP 波和 PS 波的走时分别约为 101.8 ms 和 138.6 ms, 与模型设计参数相符, 进一步说明了模拟结果的正确性。X 分量记录中 PP 波的能量强于 Z 分量, Z 分量中的 PS 波和 SS 波的能量均比 X 分量中的能量要强很多; 掌子面上激发获得的反射波能量均要比隧道两侧壁激发所获得的能量强。

因此, 当界面倾角为 90° 时, 掌子面两端激发的共炮点观测系统则有利于前方地质界面反射波信息的获取, 且横波能量较强。

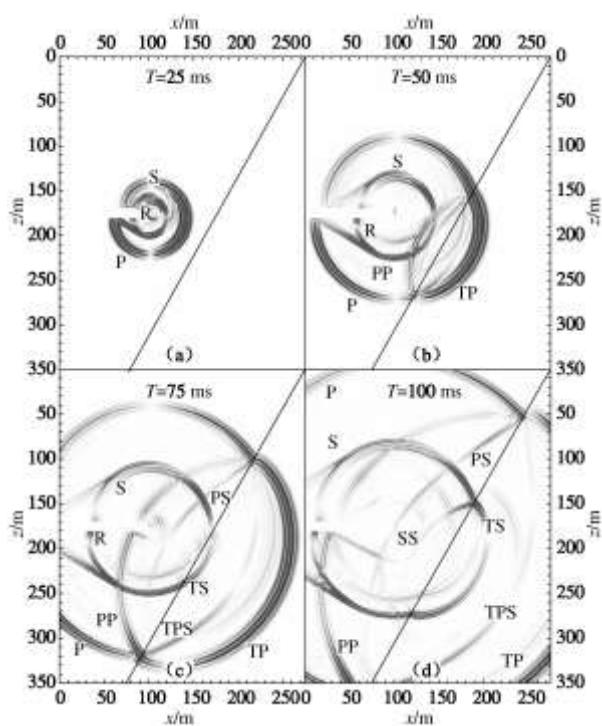


图 4 倾斜 60° 波场快照

Fig. 4 Wave-field snapshots for geological interface in 60 degree

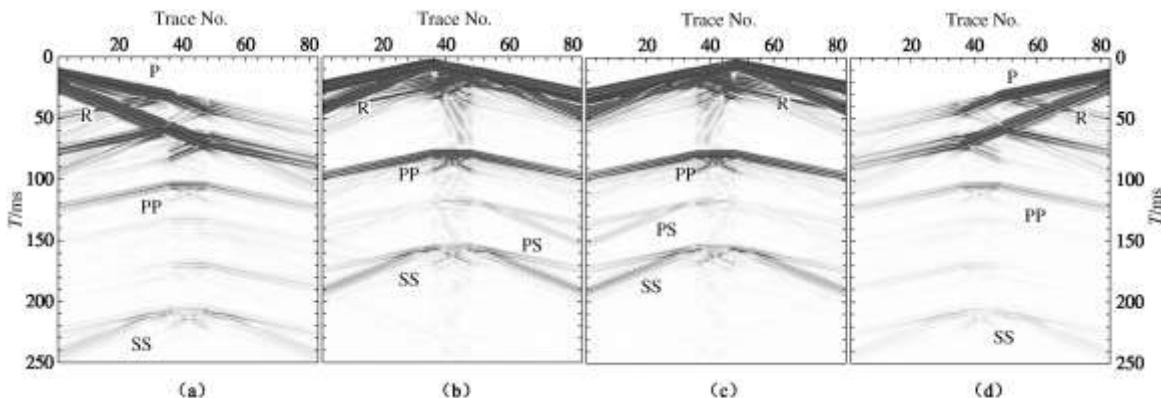


图 5 倾斜 90° X 分量记录

Fig. 5 X component for geological interface in 90 degrees

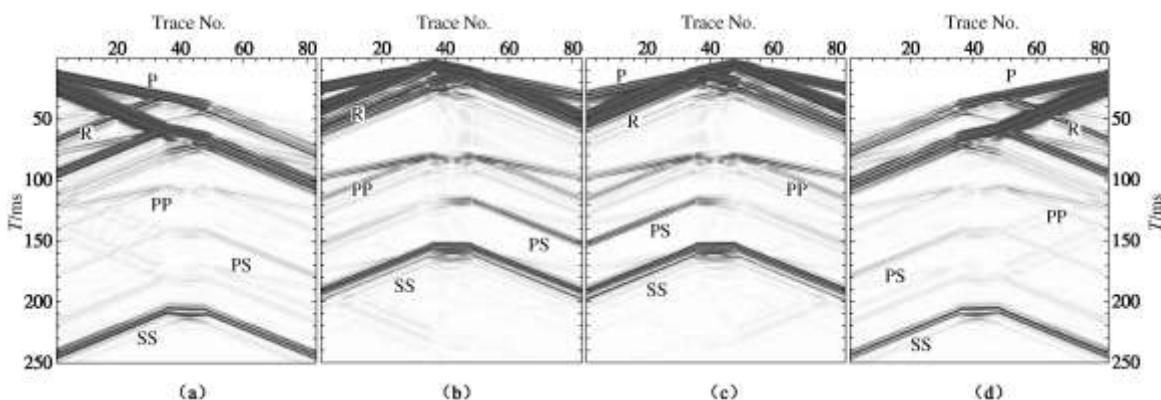


图 6 倾斜 90° Z 分量记录

Fig. 6 Z component for geological interface in 90 degrees

模型 I -2 的模拟记录如图 7, 8 所示, 相对于模型 I -1 而言, 同侧壁激发的前两炮记录中, X 分量的 PP 波、PS 波和 SS 波的能量均增强; Z 分量的 PP 波和 PS 波的能量有所增强, SS 波的能量均有所减弱, 但是 X 分量中 PS 波和 SS 波的能量相对于 Z 分量中的能量仍较弱。在第三炮记录中, X 分量的 PP 波、PS 波和 SS 波的能量均增强; Z 分量的 PP 波和 PS 波能量均有所减弱, 而 SS 波的能量增强。在第四炮记录中, 反射波的能量相对于模型 I -1 中的均减弱。因此, 倾斜地质界面的情况下, 在界面同一侧激发和接收到的前方地质界面反射波能量强, 有利于侧壁观测系统记录的获取; 同时可以发现, 在掌子面上的地质界面

上倾方向 (第三炮位置) 激发, 接收的得到的 SS 波能量在四炮记录中强, 故有利于横波勘探。

模型 I -3 的模拟记录如图 9, 10 所示, 相对于模型 I -1 而言, X 分量的 PP 波、PS 波和 SS 波能量继续增强; Z 分量的 PP 波的能量也有所增强, PS 波和 SS 波的能量仍减弱, 但是 X 分量中 PS 波和 SS 波的能量相对于 Z 分量中的能量还是很弱。在第三炮记录中, X, Z 分量记录的 PP 波、PS 波的能量有所增强, 而 SS 波则减弱; 在第四炮记录中, 反射波的能量相对于模型 I -2 中的均减弱。整体而言, 随着倾角减小, 靠近地质界面一侧接收到反射波能量逐渐增强。

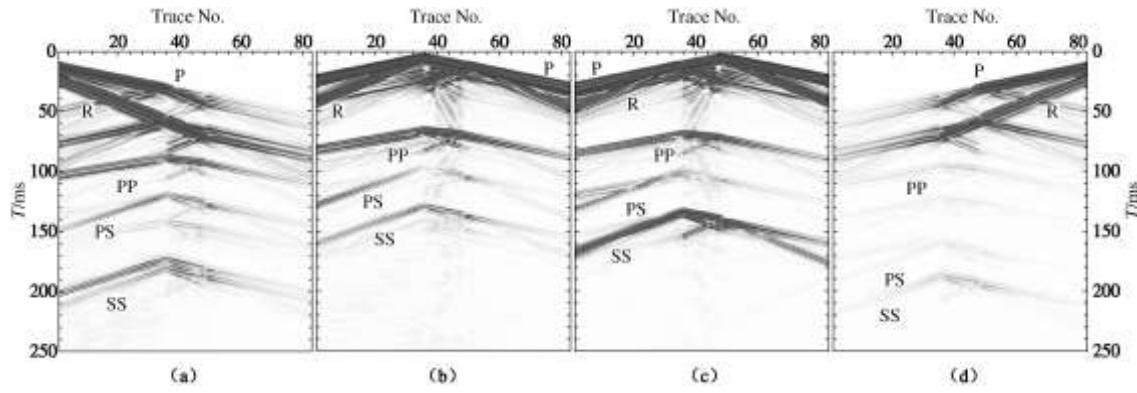


图 7 倾斜 60° X 分量记录

Fig. 7 X component for geological interface in 60 degrees

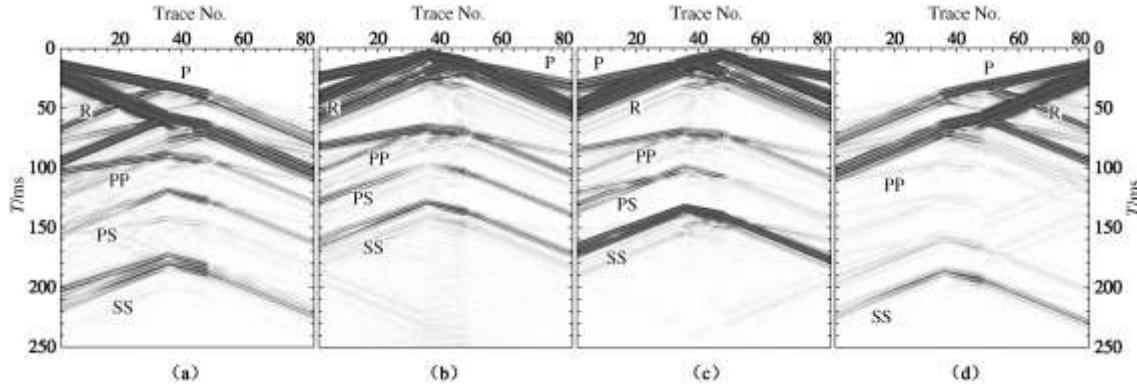


图 8 倾斜 60° Z 分量记录

Fig. 8 Z component for geological interface in 60 degrees

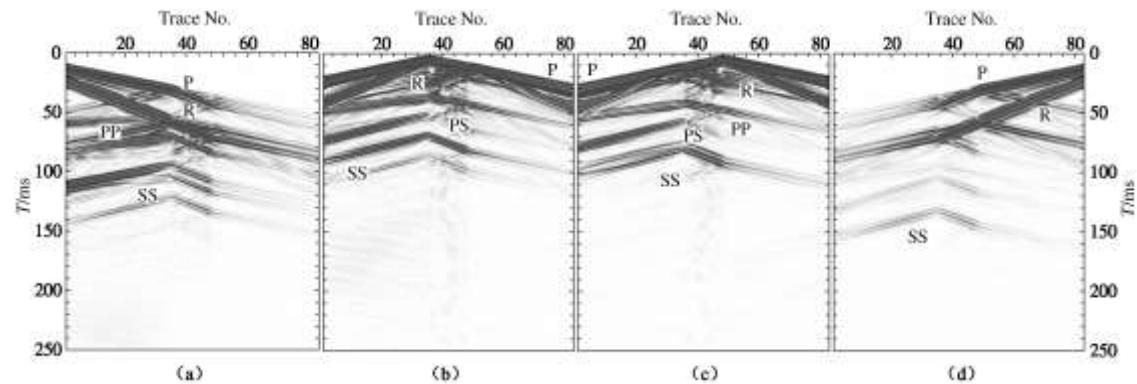


图 9 倾斜 30° X 分量记录

Fig. 9 X component for geological interface in 30 degrees

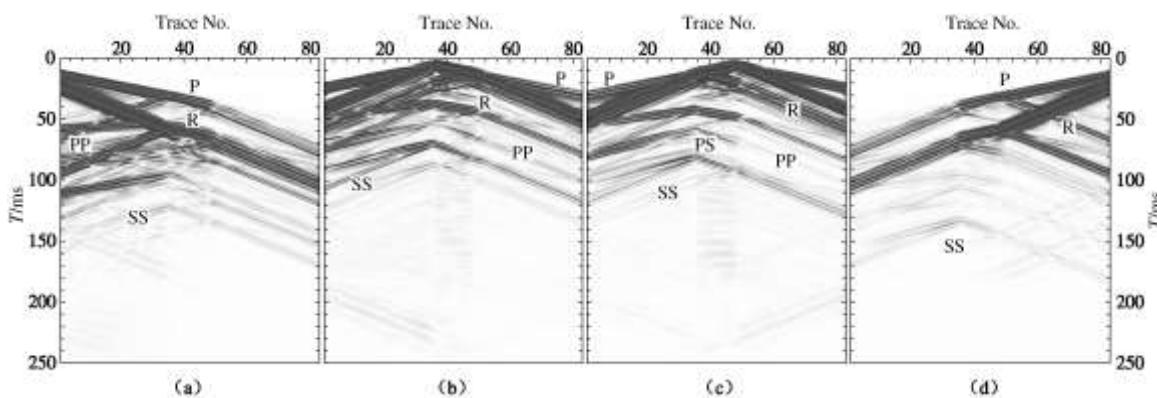


图 10 倾斜 30° Z 分量记录

Fig. 10 Z component for geological interface in 30 degrees

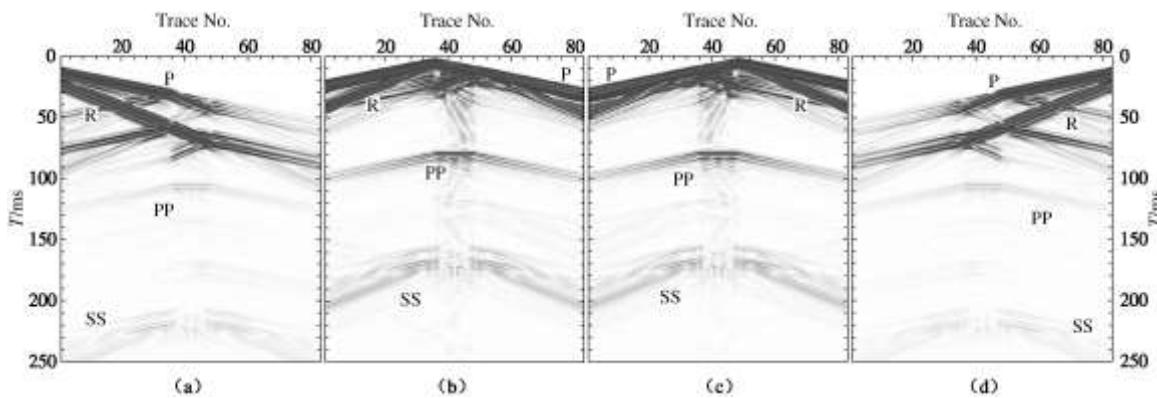


图 11 溶洞 X 分量记录

Fig. 11 X component for karst cave models

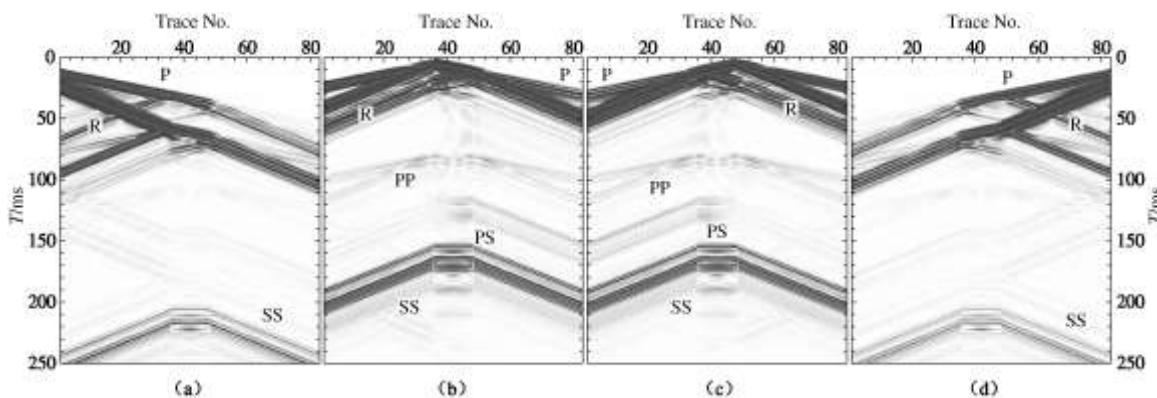


图 12 溶洞 Z 分量记录

Fig. 12 Z component for karst cave models

4.2 模型 II 的模拟结果与分析

图 11、12 为溶洞地质模型的 X, Z 分量记录, 与模型 I -1 相似, 掌子面激发获得的记录 (b) 和 (c) 的能量要明显强于侧壁激发的记录 (a) 和 (d)。X 分量 PP 波能量强且突出, 但溶洞顶底反射不易分辨; 而 SS 波能量较弱且存在波的叠加现象。相对 X 分量而言, Z 分量 PP 波能量较弱; SS 波的能量加强且突出, 且可有效分辨溶洞的顶底反射。因此采用掌子面

激发有利于溶洞的探测, 且采用横波勘探具有高的分辨率。

5 实际记录对比

为了验证以上模拟结果在实际探测中的有效性, 选取某高速公路基于侧壁观测系统的隧道超前预报记录如图 13 (a) 所示, 由图可见, 主要存在两个反射界面, 表层实测纵、横波速度分别约为 2500 m/s 和

1000 m/s, 主要采集参数偏移距为 0.0 m、道间距为 1.5 m、接收道数为 26、采样间隔为 0.125 ms、记录长度为 140 ms。据此设计了一个 3 层的理论地质模型, 两个界面的倾角均为 90°, 距离掌子面的深度分别为 38 m 和 117 m, 纵横波速度分别为 2500, 2650, 3000 和 1000, 1400, 1600 m/s, 模拟参数与模型 I 和 II 相同。图 13 (b) 为与实际观测系统相同的理论模拟记录, 对比两者可知, 直达波 P、面波 R、第一个界面的反射纵波 PP_1 与反射横波 SS_1 和第二个界面的反射纵波 PP_2 在波场形态上能较好的对应, 进一步证明了二维全波场模拟的正确性和有效性。记录中仍存在隧道掌子面物性突变点的直达波和面波的绕射波, 不过反射波能量要明显强于干扰波。

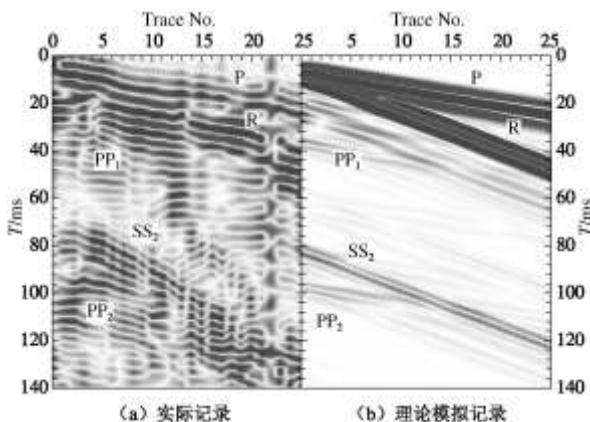


图 13 记录对比图

Fig. 13 Comparison records

6 结 论

(1) 把隧道作为空气介质建立地质模型, 并加入吸收边界条件, 采用空间四阶时间二阶交错网格有限差分法, 可有效、正确地实现隧道空间的二维地震全波场模拟; 波场特征能够正确反映不同地质体下地震波的传播形态以及变化规律, 可以为实际隧道超前预报观测系统的设计和数据的采集提供依据, 同时也为隧道地震超前预报成像及反演研究提供了基础。

(2) 当地质界面倾角为 90° 时, 在隧道两侧壁激发和接收时获得的反射波能量较弱, 因此在掌子面上或附近激发, 采用共激发点观测系统有利于反射信息的获得和界面的成像。

(3) 随着地质界面倾角的逐渐减小, 在隧道中靠近地质界面一侧激发时, 同侧接收的反射波能量逐渐增强, 侧壁观测系统有利于反射波的获取。

(4) 对于溶洞和大倾角地质界面, 在掌子面和附近激发时, 采用共激发点观测系统可获取较强的横波反射能量, 有利于横波勘探。

参考文献:

- [1] 宋先海, 顾汉明, 肖伯勋. 我国隧道地质超前预报技术述评[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 605 - 613. (SONG Xian-hai, GU Han-ming, XIAO Bo-xun. Overview of tunnel geological advanced prediction in China[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 605 - 613. (in Chinese))
- [2] 赵永贵. 国内外隧道超前预报技术评析与推介[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1334 - 1352. (ZHAO Yong-gui. Analysis and recommendation of tunnel prediction techniques at home and abroad[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(4): 1334 - 1352. (in Chinese))
- [3] ZHAO Y G, JIANG H, ZHAO X P. Tunnel seismic tomography method for geological prediction and its application[J]. Applied Geophysics, 2006, 3(2): 69 - 74.
- [4] 张平松, 刘盛东, 吴健生. 隧道及井巷工程超前探测模拟及其偏移技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 2847 - 2851. (ZHANG Ping-song, LIU Sheng-dong, WU Jian-sheng. Study on detecting simulation ahead of tunnel and laneway and its migration techniques[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 2847 - 2851. (in Chinese))
- [5] 王齐仁. 隧道地质灾害超前探测方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008. (WANG Qi-ren. The study of advanced detecting methods on tunnel geological hazards[D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese))
- [6] 杜立志. 隧道施工地质地震波法超前探测技术研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2008. (DU Li-zhi. The study of tunnel seismic geological prediction technology in the process of construction[D]. Jilin: Jilin University, 2008. (in Chinese))
- [7] 鲁光银, 熊瑛, 朱自强. 隧道反射波超前探测有限差分正演模拟与偏移处理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(1): 136-141. (LU Guang-yin, XIONG Ying, ZHU Zi-qiang. Detection simulation ahead of tunnel face and reverse-time migration with reflection wave method[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(1): 136 - 141. (in Chinese))
- [8] 鲁光银. 隧道地质灾害反射波法探测数值模拟及围岩 F-AHP 分级研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009. (LU Guang-yin. Numerical simulation for tunnel geological hazard detection by reflected wave method and rock dynamic classification by F-AHP method research[D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese))
- [9] GRAVES R W. Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite difference[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86(4): 1091 - 1106.
- [10] CERJAN Charles, KOSLOFF Dan. A nonreflecting boundary

condition for discrete acoustic and elastic wave equation[J].

Geophysics, 1985, **50**(4): 705 - 708.