

文章编号:0253-9993(2011)03-0456-05

陷落柱三维地震正演模拟及对比分析

李艳芳¹,程建远¹,熊晓军²,聂爱兰¹,张宪旭¹

(1. 煤炭科学研究总院 西安研究院,陕西 西安 710054;2. 成都理工大学 信息工程学院,四川 成都 610059)

摘要:设计了在煤层截面上长轴大小分别为80、50、25和15 m的4个陷落柱,其空间形状不规则、顶部发育高度不等,利用三维地震单程声波方程对4个陷落柱进行了正演模拟,对其中一条典型剖面开展了二维地震正演模拟(包括单炮和平面波),并对陷落柱的二维地震与三维地震模拟剖面进行了对比分析。结果表明:相对于二维地震正演模拟而言,陷落柱三维正演模拟反映的陷落柱边界清晰,与实际大小相符,且对小陷落柱的识别能力有一定的提高。

关键词:陷落柱;三维地震;二维地震;正演模拟;地质模型

中图分类号:P631.4 **文献标志码:**A

3D seismic forward modeling of collapse column and comparison

LI Yan-fang¹, CHENG Jian-yuan¹, XIONG Xiao-jun², NIE Ai-lan¹, ZHANG Xian-xu¹

(1. Xi'an Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China; 2. College of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Designed the 3D seismic geological collapse column model of irregular shape and different height, which consists of four collapse columns with the major axis size of 80, 50, 25 and 15 m, forward modeling the 3D model by using one-way wave equation methods, extracted a typical seismic profile and carried out 2D forward modeling (including single-shot and plane wave), the seismic forward modeling profiles of 3D collapse column and 2D collapse column were compared. The results show that compared with 2D seismic modeling, the stack profile and migration profile of 3D forward modeling reflecting the clear boundary collapse column and consistent with the actual size, it also has an improvement in recognizing small collapse column.

Key words: collapse column; 3D seismic; 2D seismic; forward modeling; geological model

我国华北地区含煤地层中陷落柱较为发育,给煤矿高效安全开采带来很大隐患。由于陷落柱是一种孤立的地质体,其空间形态不规整、大小不一、高度各异、隐蔽性强、呈点状突水通道等特征,陷落柱探测的技术难度较大^[1]。近年来,不少学者对利用三维地震技术探测陷落柱进行了理论研究和实例分析。勾精为等通过物理模型试验和理论计算证明了三维地震方法探测陷落柱的可行性^[2];程建远等在徐州矿区利用三维地震技术解释了陷落柱,并得到了工程验证^[3];杨德义等通过数学模型对断陷点绕射波的初步研究,提出延迟绕射波在陷落柱识别和解释中具有重要作用^[4-6];吴守华、李飞等分析了陷落柱的地震响应特征,提出判别陷落柱的依据^[6-8];李之奋等从

陷落柱物性基础出发,设计了陷落柱二维地震数学模型,运用正演模拟方法,分析了不同大小陷落柱的地震响应特征及其分辨率^[9];周国兴等采用奇异值分解技术,对小陷落柱异常波的特征提取进行了研究^[10]。以上对于陷落柱的研究主要局限于二维地震数值模拟分析,而实际的陷落柱往往是三维的。另外,根据煤矿探采对比结果的不完全统计,目前,三维地震技术对于长轴直径25 m以上陷落柱解释的准确率仅为40%~50%。为了更加真实地反映陷落柱的地震响应特征,克服二维正演模拟的不足,进一步提高陷落柱的地震识别能力,本文结合煤矿生产实际情况,设计了陷落柱的三维地震地质模型,采用单程波三维地震数值模拟方法,研究陷落柱的地震响应特

收稿日期:2010-08-25 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家重大基础研究发展计划(973)项目(2006CB220208);大型油气田及煤层气开发科技重大专项课题(2008ZX05040-003);科技部科研院所技术开发研究专项资金联合资助项目(NCSTE-2007-JK-ZK-190)

作者简介:李艳芳(1979—),女,山西晋城人,博士研究生。E-mail:liyanfangxuzhou@163.com

征,并与二维地震模拟结果进行了对比分析。

1 三维地震正演模拟方法

地震正演模拟可分析地震波在地下介质中的传播规律,为地震数据采集、处理、解释提供理论依据,还可用来检验各种解释成果的可靠性,在地震勘探中得到了广泛应用^[11]。地震正演模拟方法包括物理模拟和数值模拟。目前,对于陷落柱的模拟大多采用数值模拟方法。地震波场数值模拟方法可分为3类:射线追踪法、积分方程法和波动方程模拟。射线追踪法属于几何地震学方法,主要考虑地震波传播的运动学特征,缺少地震波的动力学信息,在应用中有一定限制条件;积分方程法源于惠更斯原理,具有良好的解析性,但由于受几何形态的约束,在实际应用中受到一定限制;而波动方程数值解法包含了地震波传播的动力学特征,波场信息丰富,模拟结果较为准确。随着计算机性能的不断提高,基于波动方程的地震波场数值模拟将代表今后的主要发展方向^[11-15]。

波动方程数值模拟可分为单程和双程。双程波动方程数值模拟的地震波场信息丰富,但包含各种干扰波,计算效率低,不利于快速直观地分析地质体的地震反射特征;单程波动方程数值模拟仅考虑地震波传播过程中的上行波或下行波,算法简单,计算速度快,仅考虑一次反射波和不规则点的绕射波,信噪比高。利用单程波动方程的优点,以二维波场延拓公式为基础,将其推广到三维空间,可得到垂向变速介质的三维地质体正演和偏移成像的波场延拓公式,在二维或三维空间选取多个参考速度进行拉格朗日插值计算,进而能够有效地实现地下复杂地质体的地震波场数值模拟,其算法稳定,计算速度快,还可处理一定的横向变速,具有很大的适用性^[11-14]。

2 陷落柱三维地质模型设计

三维地震地质模型可方便地描述地质体的三维

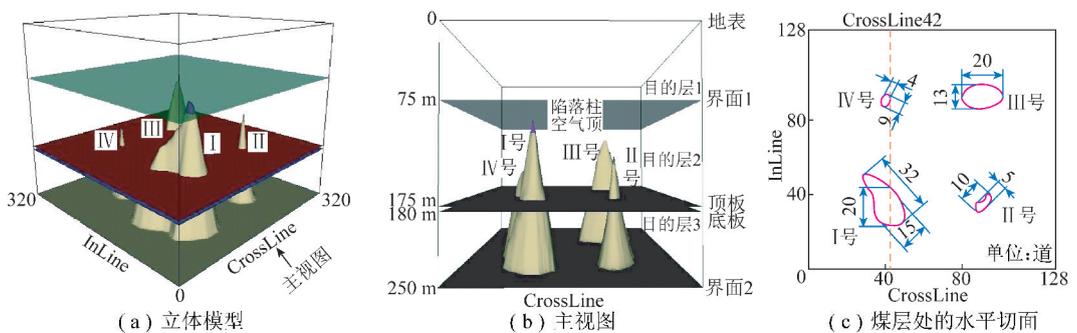


图1 陷落柱三维模型示意

Fig. 1 Schematic of 3D collapse column model

几何形态和空间分布特征,但由于三维地震正演模拟计算量大、对计算机内存与运算速度要求高等原因,一直没能引入到地震勘探中。本文将三维地震单程声波方程数值模拟技术引入到煤矿陷落柱三维地质模型的正演模拟中。三维地质建模具体步骤:首先构建三维地质体的实体模型,即在真实的三维空间中,设计出包括待模拟的各种地质构造与地层结构;然后把整个三维地质体按照一定的空间剖分间隔网格化,网格的尺寸划分得越小,参数值与实际误差越小,模型越细致、精度越高;再次,对各个目的层位网格进行插值处理,得到网格大小为 $2.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ 的数字剖分模型,进而对所有的目的层进行立体插值,得到体元为 $2.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ 的三维地质体;最后对各个空间单元赋予相应的纵波速度和密度值,得到所有采样点的纵波速度和密度数组,即 $\text{VEL}()$ 和 $\text{DEN}()$ 。

本文设计了陷落柱的三维地质模型,如图1所示,地表处的深度为0,“界面1”为自上向下的第1个水平界面,深度为75 m;“界面2”的深度为250 m,代表了模型的底界;地表与“界面1”之间为“目的层1”,“界面1”与“顶板”之间为“目的层2”;煤层的“顶板”和“底板”的深度分别为175 m和180 m,煤厚为5 m;“底板”与“界面2”之间为“目的层3”;在“界面1”与“界面2”之间包含4个穿过煤层的陷落柱,其编号如图1(c)所示。各个陷落柱在沿煤层切面上的长轴、短轴大小见表1;另外I号陷落柱顶端有一个空顶,代表了I号陷落柱顶端由于陷落高度很高而出现的空气顶,各个目的层的深度范围、厚度、纵波速度和密度见表2。由于陷落柱形状不规则、高度不等,图2给出了该陷落柱三维地质模型150、200、250 m几个深度的水平切片^[6,16-17]。

3 陷落柱地震数值模拟

3.1 三维地震正演模拟

采用平面波入射、自激自收的观测方式,共模拟

表 1 陷落柱尺寸参数

Table 1 List of collapse column size

陷落柱	I 号	II 号	III 号	IV 号
长轴/m	80.0	25.0	50.0	15.0
短轴/m	37.5	12.5	32.5	10.0

表 2 陷落柱三维地质模型的物性参数

Table 2 Physical parameters of 3D geological collapse column model

地 层	深度范 围/m	高度/ m	纵波速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)
目的层 1(新生界)	0 ~ 75	75	1 800	1.20
目的层 2(顶板砂岩)	75 ~ 175	175	3 200	2.20
煤层	175 ~ 180	5	2 200	1.40
目的层 3(底板砂岩)	180 ~ 250	175	3 200	2.20
空气顶	85 ~ 100	15	330	0.01
陷落柱	陷落柱	100 ~ 250	1 500	1.60

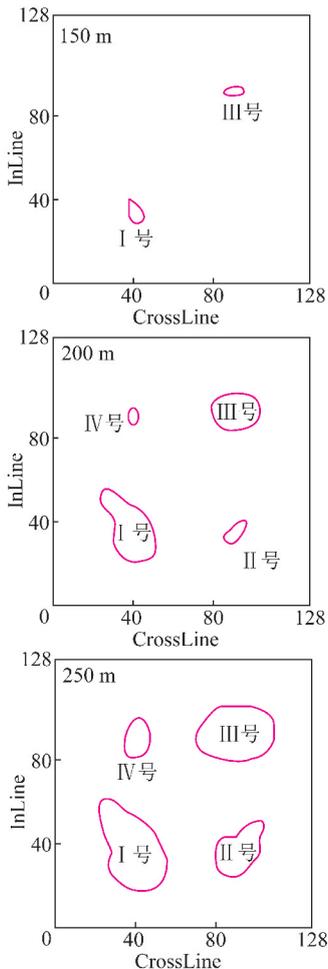


图 2 陷落柱三维地质模型在 150、200、250 m 深度上的水平切片

Fig. 2 Horizontal slices in 150, 200, 250 m depth of 3D geological collapse column model

了 129 条测线, 线号从 0 到 128, 每条线的接收道数为 129, 道号从 0 到 128, 图 1(c) 为煤层处的水平切

片, 纵横坐标为线号和道号, 时间采样间隔为 1 ms, 每个接收道的采样时间从 0 开始, 到 498 ms 结束, X、Y 方向的空间采样间隔为 2.5 m, 深度采样间隔为 1 m, 主频为 70 Hz。以三维陷落柱模型的 Cross-Line42 线为例, 其地质剖面、速度剖面和反射系数剖面如图 3 所示。

三维地震正演模拟后, 获得了陷落柱三维地震叠加剖面, 对其进行了偏移处理。抽取 CrossLine42 剖面的三维地震模拟叠加与偏移剖面, 如图 4 所示, 其中图 4(a)、(b) 分别为陷落柱三维数值模拟的 Cross-Line42 线叠加剖面 and 偏移剖面, 图 4(c) 为最大振幅属性的水平切片。

3.2 二维地震正演模拟

3.2.1 二维单炮模拟

为了进行对比分析, 本文选择三维地震的 Cross-Line42 线, 用 Tesseral 软件进行二维地震单炮数值模拟, 观测系统为: 道距为 5 m, 48 道接收, 炮距为 5 m, 炮数为 88 炮, 每次移动 1 道, 中点放炮, 24 次覆盖, 子波为主频 70 Hz 的雷克子波, 采样间隔为 1 ms, 声波模拟。按照上述观测系统对 CrossLine42 剖面进行二维单炮数值模拟, 并进行处理后得到二维地震叠加剖面如图 5(a) 所示, 对叠加剖面进行偏移后得到二维偏移剖面如图 5(b) 所示, 图 5(c) 为二维单炮模拟的波场快照。

3.2.2 二维平面波模拟

同样, 选择三维地震的 CrossLine42 线, 用 Tesseral 软件对其进行二维平面波数值模拟, 观测系统为: 震源为 Surface, 计算模式为 Invisible, 道距为 2.5 m, 吸收边界宽度为 200 m, 子波为主频 70 Hz 的雷克子波, 采样间隔为 1 ms, 声波模拟。二维平面波数值模拟的结果如图 6 所示, 图 6(a) 为二维地震平面波模拟的叠加剖面, 图 6(b) 为二维地震平面波模拟的偏移剖面, 图 6(c) 为二维平面波模拟的波场快照。

4 三维与二维地震正演模拟结果对比分析

由图 4 可看出: 在三维地震模拟的叠加剖面上, 陷落柱发育区反射波同相轴扭曲、能量变弱、连续性变差(图 4(a))^[6,16], 其中由于 I 号陷落柱为空顶, 在叠加剖面上顶部绕射发育明显, 但由于受模型尺寸的限制, 边界绕射强, 与空顶绕射有相互干涉; 在三维地震属性水平切片上, 陷落柱发育区表现为圈闭现象(图 4(c)); 在三维地震偏移剖面上, I 号陷落柱发育区反射波同相轴中断, 中断距离大概为 20 道, 道距为 2.5 m, 则陷落柱范围为 50 m(图 4(b)), 其空顶偏移后绕射波收敛为 1 个短轴反射。按照理论设计, 图

3(a)中地质剖面上煤层处 I 号陷落柱大小为 50.51 m,与图 4(b)的偏移剖面的陷落柱大小基本一

致。同时,IV 号小陷落柱(直径 15 m)在偏移剖面上也有能量减弱的反映。

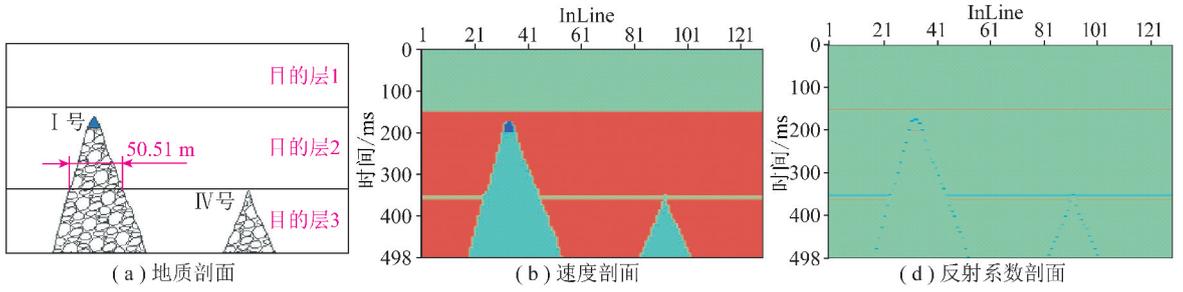


图3 CrossLine42 三维剖面

Fig. 3 3D profile of CrossLine42

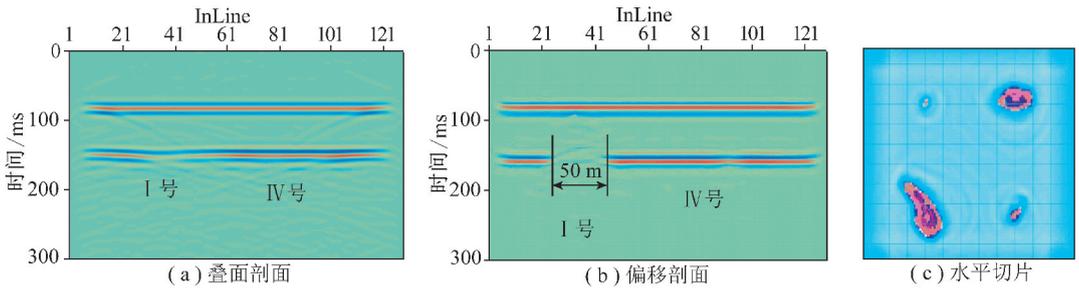


图4 CrossLine42 剖面三维地震数值模拟

Fig. 4 3D seismic numerical simulation of CrossLine42 profile

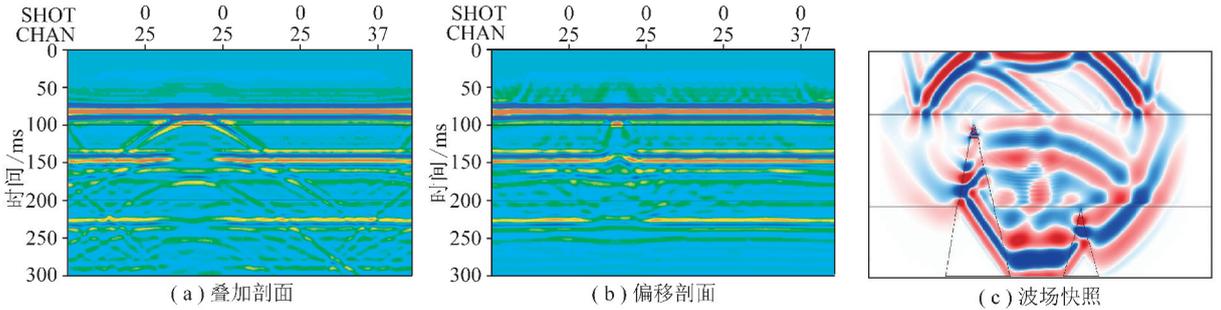


图5 CrossLine42 二维单炮数值模拟

Fig. 5 2D single-shot numerical simulation of CrossLine42

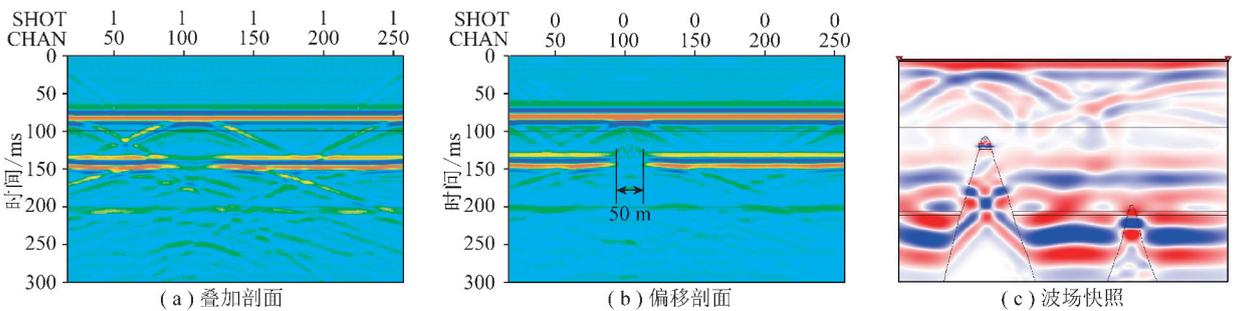


图6 CrossLine42 二维平面波数值模拟

Fig. 6 2D plane wave numerical simulation of CrossLine42

由图 5、6 可知,在二维单炮模拟的叠加剖面上,陷落柱发育区反射波同相轴扭曲、能量变弱、连续性变差^[6,16],I 号陷落柱顶端的空气出现强的绕射;在二维地震单炮模拟处理后的偏移剖面上,I 号陷落柱发

育区反射波同相轴扭曲、中断,但边界不太清晰、绕射波没有完全收敛(图 5(b));在二维地震平面波模拟剖面上,I 号陷落柱发育区反射波同相轴中断,中断边界清晰,大小与实际相符(图 6(b));而在二维地

震单炮及平面波的叠加、偏移剖面上,IV号小陷落柱均无明显反应。

陷落柱的主要识别标志之一是煤层断陷点产生的绕射波,二维地震模拟时小陷落柱产生的绕射波常常淹没在反射波强大的背景之中,由于三维地震单程波动方法仅考虑一次反射波和不规则点的绕射波,因此三维模拟对于小陷落柱的显示更加清晰,提高了小陷落柱的平面检测能力。

5 结论与讨论

相对于二维地震正演模拟而言,陷落柱三维地震正演模拟的叠加和偏移剖面,均能真实地反映陷落柱的地震响应特征,反映出的陷落柱边界清晰,与实际大小相符,且对小陷落柱的识别能力有所提高,尤其是对于空顶型陷落柱可以依据顶端绕射或偏移后的顶部短轴反射来间接判断陷落柱的发育高度,这一点对于预防陷落柱导通煤层上部含水层尤为重要。

应该说明的是:对陷落柱的地震识别是一项综合性技术,小型陷落柱的识别能力受子波频率、采样密度、采样间隔、噪音水平、处理水平等多种因素影响,也与陷落柱的三维地震检测手段密切相关,今后还需对陷落柱进行分辨率极限与属性分析方面的研究。

参考文献:

[1] Zhang Shaohong, Lin Changrong. Study on the genesis of karstic collapse column and characteristics of high resolution seismic data in one coal field[J]. Journal of Coal Science & Engineering(China), 2008, 14(4): 648-650.

[2] 勾精为,程增庆,陈加林. 三维地震探测陷落柱的可行性研究[A]. 计算机在地学中的应用国际讨论会论文摘要[C]. 北京:地矿部北京计算中心,1991:150-155.

[3] 张时元,程建远,何文欣,等. 三维地震在陷落柱探测中的应用[J]. 中国煤田地质,1997,9(S0):29-32.

Zhang Shiyuan, Cheng Jianyuan, He Wenxin, et al. The application of 3D seismic exploration to detect the collapsed column[J]. Coal Geology of China, 1997, 9(S0):29-32.

[4] 杨德义,王 贲,王 辉. 陷落柱的绕射波[J]. 石油物探,2000, 39(4):82-86.

Yang Deyi, Wang Yun, Wang Hui. Diffraction waves from fallen pillars[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2000, 39(4):82-86.

[5] 杨德义,彭苏萍,常锁亮,等. 特殊剖面在陷落柱研究中的应用[J]. 煤田地质与勘探,2002,30(6):47-49.

Yang Deyi, Peng Suping, Chang Suoliang, et al. The application of special seismic section in the subsiding column searching[J]. Coal Geology & Exploration, 2002, 30(6):47-49.

[6] 师素珍,方惠明,郝海波,等. 煤矿岩溶陷落柱的地震资料解释[J]. 中国煤炭地质,2009,21(6):59-61.

Shi Suzhen, Fang Huiming, Hao Haibo, et al. Seismic interpretation of subsided column in coalmines[J]. Coal Geology of China, 2009,

21(6):59-61.

[7] 吴守华,周国兴,杨素霞,等. 陷落柱地震响应特征分析[J]. 煤田地质与勘探,2004,32(3):52-54.

Wu Shouhua, Zhou Guoxing, Yang Suxia, et al. Analysis for the seismic response characteristics of collapse column[J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32(3):52-54.

[8] 李 飞,张 智,曹志勇,等. 陷落柱地震波场特征分析[J]. 地球物理学进展,2009,24(3):886-892.

Li Fei, Zhang Zhi, Cao Zhiyong, et al. Analysis on seismic features of subsided column[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(3):886-892.

[9] 李之奋,董守华,李东会. 陷落柱地震数值模拟响应特征分析[J]. 能源技术与管理,2007(6):36-39.

Li Zhifen, Dong Shouhua, Li Donghui. Analysis for the characteristics in the numerical simulation of the seismic wave field of collapse column[J]. Energy Technology and Management, 2007(6):36-39.

[10] 周国兴,杨文钦,杨文强. 小陷落柱异常波提取及其特征的模型研究[J]. 煤田地质与勘探,2006,34(5):63-65.

Zhou Guoxing, Yang Wenqin, Yang Wenqiang. Modeling research on characteristics and extraction method of abnormal seismic waves on small scale karst collapse column[J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 34(5):63-65.

[11] 熊晓军,贺振华,黄德济. 三维波动方程正演及模型应用研究[J]. 石油物探,2005,44(6):554-556.

Xiong Xiaojun, He Zhenhua, Huang Deji. The application of 3-D wave equation forward and modeling[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005, 44(6):554-556.

[12] Yang Jinhua, Liu Tao, Tang Genyang, et al. Modeling seismic wave propagation within complex structures[J]. Applied Geophysics, 2009, 6(1):30-41.

[13] 程建远,王玺瑞,郭晓山,等. 东庞矿突水陷落柱三维地震处理效果与对比[J]. 煤田地质与勘探,2008,36(1):62-65.

Cheng Jianyuan, Wang Xirui, Guo Xiaoshan, et al. 3D seismic processing for subsidence column detection applied in Dongpang Coal Mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(1):62-65.

[14] 熊晓军. 单程波动方程地震数值模拟新方法研究[D]. 成都:成都理工大学,2007.

[15] 肖开宇,胡祥云. 正演模拟技术在地震解释中的应用[J]. 工程地球物理学报,2009,6(4):459-464.

Xiao Kaiyu, Hu Xiangyun. Forward seismic modeling technology in the application of interpretation[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(4):459-464.

[16] 张广忠,程建远,李林元,等. 东庞煤矿突水陷落柱边界的综合解释[J]. 煤炭学报,2006,31(S0):88-92.

Zhang Guangzhong, Cheng Jianyuan, Li Linyuan, et al. Integrated interpretation of inrushing collapse column's boundary in Dongpang Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(S0):88-92.

[17] 郭达志,盛业华,金学林,等. 岩溶陷落柱综合探测的基本原理与方法[J]. 煤炭学报,1994,19(6):626-633.

Guo Dazhi, Sheng Yehua, Jin Xuelin, et al. Basic principles and methods for survey of karst pillars[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6):626-633.