

曹志勇, 王伟, 王赞. 煤层陷落柱散射波数值模拟与成像. 地球物理学报, 2012, 55(5): 1749-1756, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 05. 032.

Cao Z Y, Wang W, Wang Y. Numerical simulation and imaging of scattered wave of sunk pillar in coal seam. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(5): 1749-1756, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 05. 032.

煤层陷落柱散射波数值模拟与成像

曹志勇¹, 王伟^{2*}, 王赞³

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 100029 北京

2 资源与环境信息系统国家重点实验室, 中国科学院地理科学与资源研究所, 100101 北京

3 矿床地球化学国家重点实验室, 中国科学院地球化学研究所, 550002 贵阳

摘 要 煤层陷落柱是煤田勘探开发中常见的一种典型的非均匀地质体. 由于来自陷落柱的反射信号少、反射能量弱, 使得基于反射波原理的常规地震成像方法难以有效识别陷落柱. 本文以散射波理论为基础, 采用数值模拟方法, 研究了陷落柱的散射波场特征, 研究表明地面接收的波场中含有来自陷落柱陡倾角界面的散射波场. 通过共散射点道集波场的模拟, 可以清晰地识别散射波, 获得地下散射点和非均匀地质体的信息, 判断散射点的位置, 从而勾画出不均匀地质体的形态. 采用等效偏移距假设抽取共散射点道集, 在此基础上进行叠前偏移, 对陷落柱成像; 模拟与实际数据成像结果对比表明此方法能够合理地提取散射点的散射波场信息, 对陷落柱形态及内部结构准确成像, 是一种有效的煤田陷落柱成像方法.

关键词 陷落柱, 散射波, 共散射点道集, 等效偏移距, 成像

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 05. 032

中图分类号 P631

收稿日期 2011-04-06, 2011-09-28 收修定稿

Numerical simulation and imaging of scattered wave of sunk pillar in coal seam

CAO Zhi-Yong¹, WANG Wei^{2*}, WANG Yun³

1 *Institute of Geology & Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2 *State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*

3 *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*

Abstract The scattered wave theory has built the basis of scattered wave imaging of the sunken pillar in coal field seismic exploration. When seismic waves meet with the scatter point underground, the waves propagate around and generate scattered waves. And then reflection is formed by enhancing energy interference of scattered waves. Through the numerical modeling, we can receive the scattered waves from the steep dip interface of the sunken pillar in coal seam. After researching wave characteristic on common scatter point (CSP) gathers, we can recognize the scattered waves, and obtain the information of geologic structure underground, including the

基金项目 科技部 973 项目 (2006CB202207)、国家重大科技专项 (2008ZX05035-001-003, 2008ZX05035-003-006HZ, 2008ZX05008-006-004) 和地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室 (中国地质大学, 北京) 开放课题项目 (GDL0803) 联合资助.

作者简介 曹志勇, 男, 1980 年生, 中国科学院地质与地球物理研究所在读博士生, 主要从事地震各向异性理论与多分量地震技术研究.
E-mail: caozhy09@gmail.com

*** 通讯作者** 王伟, 男, 1972 年生, 河北涿州人, 博士, 现在中国科学院地理科学与资源研究所从事勘探地震理论与方法的研究.
E-mail: wang_wei@lreis.ac.cn

structure position and the outline of heterogeneous geologic body. Tested with field seismic data, the result of scattered wave imaging indicates that the equivalent offset method (EOM) can reasonably and accurately use the information of scattered waves, and the pre-stack time migration based on EOM is an effective method for the imaging of sunken pillars and inhomogeneous geologic bodies.

Keywords Sunken pillar, Scattered wave, CSP, Equivalent offset, Imaging

1 引言

陷落柱是中国华北、华南等地区煤田开采中的一种典型地质体,对煤炭与煤层气资源的开采具有危害.陷落柱的形成主要与构造破碎带、裂隙、地下水的活动和岩溶等因素有关^[1-2].在含煤地层的下部由于大量地下水的常年活动,导致周围可溶性岩石溶蚀形成空洞,在重力作用下,上部含煤岩层塌陷,形成陷落柱.通常陷落柱是由块度大小不均、排列杂乱的上部地层塌陷物胶结、堆积而成.与围岩相比,在地层的连续性、产状、岩性等方面均有很大的差别,导致正常反射波组不连续或能量变弱^[3-4].在陷落柱模拟与识别中,一般基于射线理论对陷落柱断陷点的绕射波进行模拟与识别.在断陷点以外或者陷落柱面陡倾情况下,很难观测到反射波^[5-7].尽管陷落柱与围岩存在着很大的岩性变化,即具有明显的波阻抗差异,但陷落柱一般为吸收介质,经过陷落柱界面反射的能量很弱.在实际生产中,由于陷落柱在空间分布上的复杂性和地震响应的特殊性,在偏移成像剖面上,陷落柱的几何边界很难被清晰成像^[8-10].

目前,常规二维、三维反射地震勘探方法在煤田勘探上已经取得了良好的效果,但从陷落柱勘探的已有成果来看,效果并不理想.陷落柱的解释主要是在反射波地震资料的基础上,利用相干技术,通过煤层的连续性或陷落柱的特征反射波识别陷落柱;煤层水平切片上解释的陷落柱位置与实际位置一般都存在较大偏差,且通常解释范围比实际范围要大^[11-12].煤田陷落柱的精确勘探不仅影响井下开采效率和资源的充分利用,同时对安全生产有着重要意义.

地震波散射理论的发展为研究煤田陷落柱的成像方法提供了新的思路^[13-18].陷落柱可以看作地下非均匀地质体,其弹性波场主要表现为多种类型的波干涉叠加,信噪比较低,能量和频率差异较大,难以形成有效的强反射;但可以观测到不均匀体产生

的广义绕射波(或称为散射波),因此可以考虑采用散射波方法来实现陷落柱成像.

本文在散射波理论的基础上,通过陷落柱的散射波场正演,分析波场特征,然后通过共散射点抽道集,对陷落柱的波场进行等效偏移距成像,以说明陷落柱的散射成像的可行性与有效性.

本文采用 Bancroft 提出的等效偏移距方法(Equivalent Offset Method, EOM)形成共散射点道集,然后对共散射点(Common Scatter Point, CSP)道集进行积分求和,此方法是一种叠前 Kirchhoff 偏移方法.该方法在形成共散射点道集时,不仅将共中心点道集上的反射能量映射到散射双曲线上,还充分利用了散射能量,从而形成高信噪比的共散射点道集;而且该方法在形成共散射点道集时,对观测系统要求不高,更适用于山地等复杂地形勘探数据,应用灵活;该方法在实际应用中,除形成共散射点道集单独实现,处理流程中的其他步骤均可以借用现有的商业软件模块实现.

2 原理与方法

2.1 散射波基本原理

在空间一频率域 (r, ω) ,波场可以分为背景场和总场,并满足标量波动方程

$$\left[\nabla^2 + \frac{\omega^2}{c_0^2} \right] U_0(r | r_s; \omega) = \delta(r - r_s), \quad (1)$$

$$\left[\nabla^2 + \frac{\omega^2}{c^2} \right] U(r | r_s; \omega) = \delta(r - r_s). \quad (2)$$

其中 ω 为角频率,量纲为 LT^{-1} , c_0 是背景速度,单位 $m \cdot s^{-1}$, $r = (x, y, z)$ 是观测点坐标, $r_s = (x_s, y_s, z_s)$ 是震源位置坐标, δ 是delta函数.观测点在背景场和总场中坐标一致.定义速度扰动为: $\alpha(r) = 1 - c_0^2/c^2(r)$,为无量纲量,并令 $k = \omega/c_0$,量纲为 L^{-1} ,用格林函数解波动方程^[19-20](1)、(2)得到 Lippmann-Schwinger 积分方程:

$$U(r | r_s; \omega) = U_0(r | r_s; \omega) + \iiint_{\mathbb{V}} U_0(r | r'; \omega) k^2 \alpha(r') U(r' | r_s; \omega) dr', \quad (3)$$

其中方程第一项表示由震源以背景速度向外传播的发散波,第二项是总场中由于介质速度相对背景速度的扰动而产生的波场. 求解方程(3)可得到 Born 序列: $U=U_0+U_1+U_2+U_3+\dots$, 设观测点的位置为 r_i , 则有:

$$U_1(r_i | r_s; \omega) = \int dr' U_0(r_i | r'; \omega) k^2 \alpha(r') U_0(r' | r_s; \omega), \quad (4)$$

$$U_2(r_i | r_s; \omega) = \int dr' U_0(r_i | r'; \omega) k^2 \alpha(r') \times \int dr'' U_0(r' | r''; \omega) k^2 \alpha(r'') U_0(r'' | r_s; \omega), \quad (5)$$

其中, U_1 的物理含义是在震源 r_s 产生的波以背景速度 c_0 传播, 入射到扰动区域 r' 处发生散射, 散射强度为 $k^2 \alpha(r')$, 之后仍以 c_0 自由传播到观测点的球面波之和. U_2 的物理含义是在震源 r_s 产生的波以背景速度 c_0 传播, 入射到扰动区域 r'' 处发生散射, 散射强度为 $k^2 \alpha(r'')$, 散射后传播到扰动区域 r' 处再次发生散射, 散射强度为 $k^2 \alpha(r')$, 之后仍以 c_0 自由传播到观测点的球面波之和. 同理 U_n 的物理含义是在震源 r_s 产生的波在扰动区域内 r' 处发生 n 次散射后, 在观测点记录的波^[21-22].

式(4)、(5)中背景场格林函数分别为:

$$U_0(k_i, z_i | r'; \omega) = e^{jk_i r'} \frac{e^{jk'_i | z_i - z' |}}{j 2k'_i}, \quad (6)$$

$$U_0(r' | k_s, z_s; \omega) = e^{jk'_s r'} \frac{e^{jk'_s | z' - z_s |}}{j 2k'_s}, \quad (7)$$

$$U_0(r' | r''; \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} dk'_m e^{jk'_m (r' - r'')} \frac{e^{jk'_m | z' - z'' |}}{j 8\pi^2 k'_m}, \quad (8)$$

其中: k_i 、 k_s 和 k_m 分别是观测点、震源点、扰动点处波场在水平面内的波数, $k'_i = \sqrt{k^2 - k_i^2}$, $k'_s = \sqrt{k^2 - k_s^2}$, $k'_m = \sqrt{k^2 - k_m^2}$, 量纲均为 L^{-1} . 本文散射波正演只计算一次散射, 即 Born 近似.

2.2 散射波偏移方法

将地下不均匀地质体看成由散射点组成, 地震波从震源传播到散射点, 被散射点散射后, 逆向散射传播到地面所有的接收点, 因此, 每个接收点均能接收到来自散射点的能量. 按照 Bancroft 和 Geiger 提出的等效偏移距方法^[23-25], 将符合双平方根方程的散射能量在没有时移的情况下, 映射到符合单平方根方程的共散射点道集上, 并且散射能量沿双曲线形态分布; 在共散射点道集上进行速度分析得到偏移速度, 应用 Kirchhoff 积分方程对散射能量进行求和, 得到偏移剖面. 关于这一方法已有详细介绍,

本文不予说明^[26].

3 算例

3.1 模型

陷落柱几何形态一般顶部为圆锥状, 下部为圆柱状. 以山西潞安矿区常见的典型陷落柱为参照建立陷落柱模型如图 1 所示. 该地区上覆第四纪黄土, 煤系地层主要分布在石炭-二叠纪, 模型参数如表 1 所示. 陷落柱顶距上覆黄土层 50 m, 陷落柱高 250 m, 陷落柱顶部倾角从上至下依次为 18° (深 250~255 m), 30° (深 255~265 m) 和 65° (深 265~300 m), 陷落柱柱壁从深 300 m 延伸到 500 m, 柱壁倾角达 87° , 因网格离散, 部分为 90° , 陷落柱内充填物为随机介质, 波速范围为 2200~2800 m/s, 低于围岩速度.

正演模拟采样相移法^[20], 模拟参数为: 模型长 1800 m, 深 600 m; 网格剖分大小为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$; 采样频率为 1 ms, 记录时间为 700 ms; 子波主频为 45 Hz, 频带范围为 1~100 Hz; 全排列接收, 道间距为 5 m, 共 360 道; 炮间距为 30 m, 共 60 炮.

3.2 散射波场特征

合成的炮集地震记录如图 2 所示, 炮点位置分别位于 810 m、900 m 和 1020 m 的位置. 从图中可

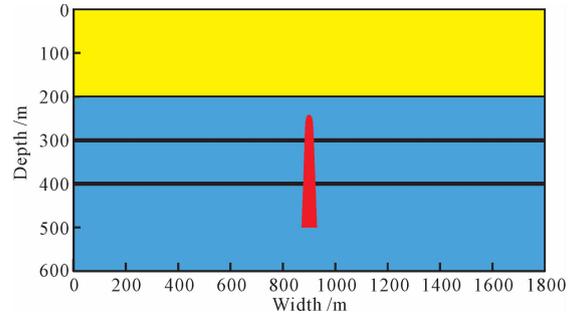


图 1 圆锥状陷落柱模型

Fig. 1 Sunken pillar model

表 1 陷落柱模型参数表

Table 1 Elastic parameters of sunken pillar in coal seams

	厚度(m)	纵波速度(m/s)	密度(g/cm ³)
松散覆盖层	200	1800	1.6
石炭-二叠地层 1	100	3000	2.8
煤层 1	5	2000	1.4
石炭-二叠地层 2	95	3000	2.8
煤层 2	5	2000	1.4
石炭-二叠地层 3	195	3000	2.8

知散射波场在炮集上的特征为:

(1) 可以接收到来自陷落柱陡倾界面的弱散射,不存在地震波散射盲区,散射波的能量主要集中于反射波射线方向;

(2) 煤层断陷点左右两支绕射波存在明显的干涉区;

(3) 断陷点散射波与陷落柱边界散射波也存在相互干涉.

如图 2 所示,在炮集 shot28 上,煤层 1、2 右侧断陷点散射波与陷落柱左侧边界弱散射波相互干涉明显.在炮集 shot30 上,煤层 1、2 左侧断陷点散射波与陷落柱右侧边界弱散射波相互干涉明显.在炮

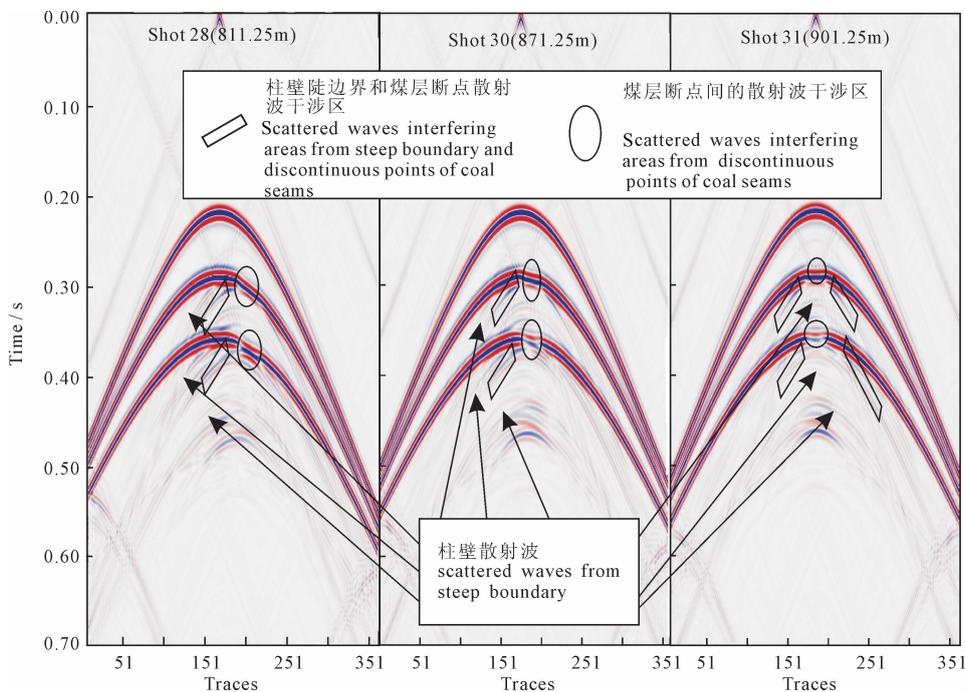


图 2 炮集散射波场特征
Fig. 2 Scattered waves in shot records

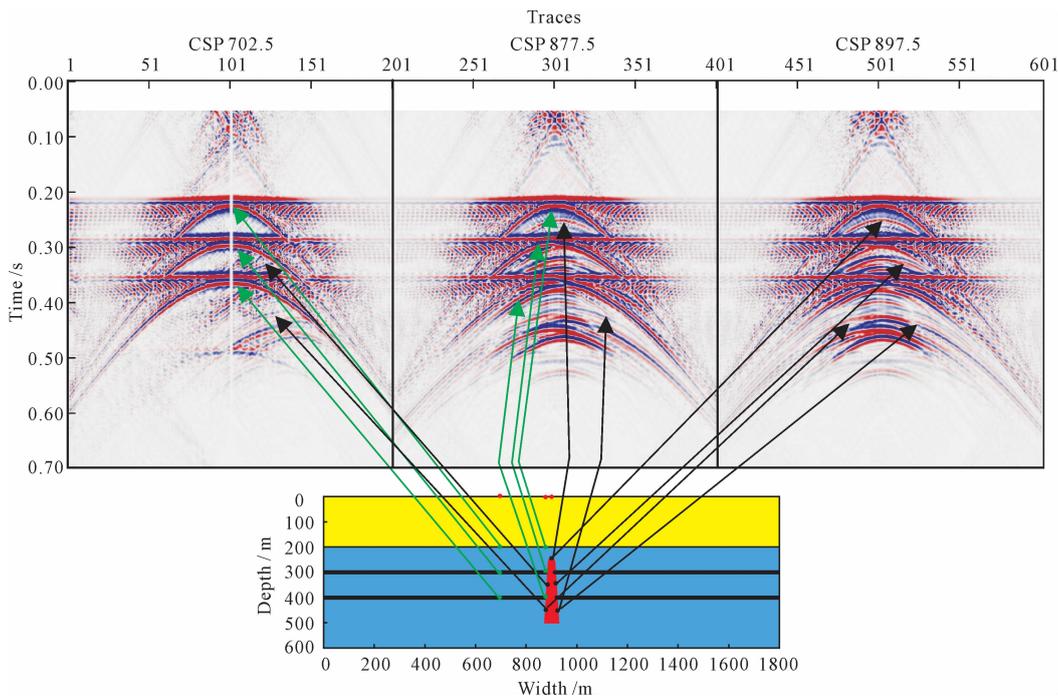


图 3 CSP 道集散射波特征
Fig. 3 Scattered waves in CSP gathers

集 shot31 上,煤层 1、2 两侧断陷点散射波与陷落柱左右边界弱散射波相互干涉,由于在陷落柱的正上方,能量较弱;但由于陷落柱内部相对低速度及煤层反射缺失,造成煤层反射同相轴下陷和强度减弱,也呈现明显的波场异常.陷落柱内随机介质散射波在炮集上不明显.

从陷落柱模型散射波单炮记录中抽取 CSP 道集记录,如图 3 所示.3 个 CSP 道集位置分别为 702.5 m、877.5 m、897.5 m.对比模型可知,散射波在 CSP 道集上的波场特征如下:

(1)CSP 道集具有很高的覆盖次数(200 次),远

比 CMP 道集覆盖次数高(CMP 道集覆盖次数为 60);(2)CSP 道集中包含其对应位置下部很大范围内地质模型的有效信息.双曲线顶点横向、纵向分布范围与模型中倾斜界面横向、纵向分布范围一致;(3)CSP 道集等效于零偏移距自激自收剖面.所以在每个 CSP 道集上都能辨认出靠近散射点部位地下模型的大致构造形态;(4)来自水平地层界面反射波是散射波定向排列、相干加强的结果,因此水平反射界面的散射能量最强.陡倾角地层或地质体界面散射能量较弱、分布范围较小,具弱散射波特征,且其双曲线顶点连线位置为倾斜界面的位置.

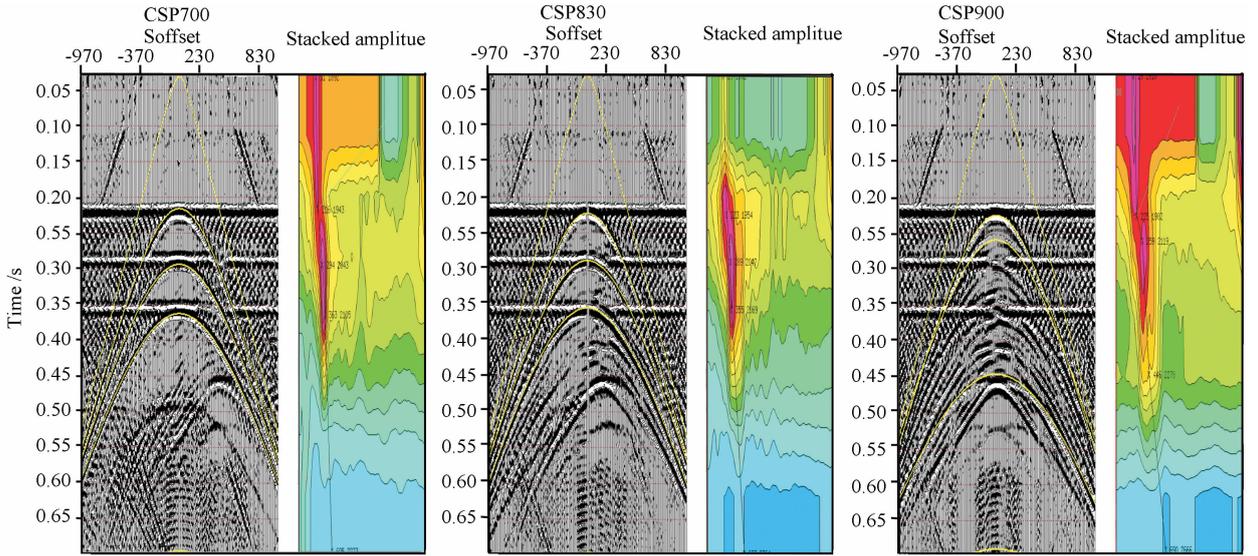


图 4 CSP 道集速度谱

Fig. 4 CSP gathers and semblances

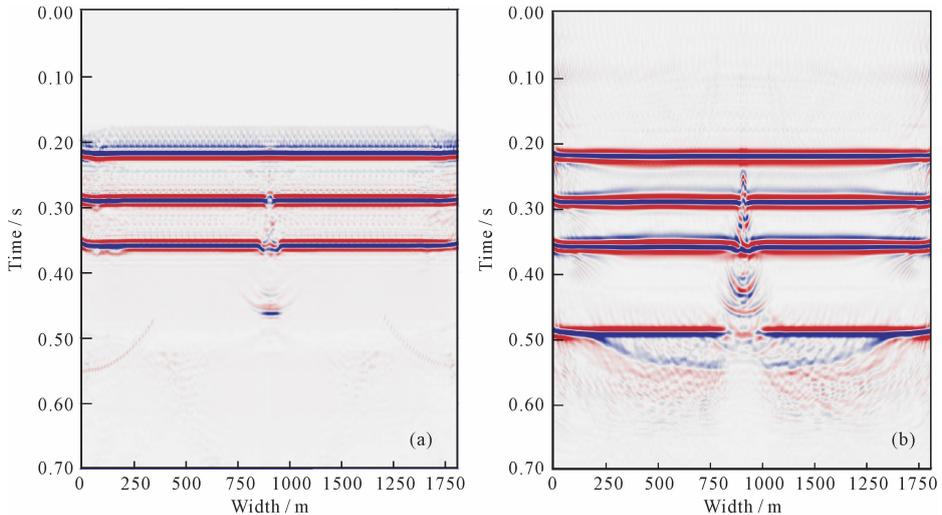


图 5 基于 CSP 道集的等效偏移距偏移剖面(a)与基于 CMP 道集的反射叠前偏移剖面(b)对比

Fig. 5 Contrast between EOM migration section based on CSP gathers(a), and pre-stack migration section based on CMP gathers(b)

图 3 中红点表示散射点道集位置;绿点表示反射界面散射点;黑点表示陷落柱界面散射点. 绿色箭头指示反射界面散射点形成的散射波双曲线;黑色箭头指示陷落柱界面散射点形成的散射波双曲线.

3.3 散射偏移成像

对 CSP 道集进行速度分析,拾取散射点偏移速度,见图 4,可以形成偏移速度场.

散射波偏移成像结果如图 5 所示,由基于 CSP 道集的等效偏移距偏移剖面与基于 CMP 道集的反射叠前偏移剖面对比可见,等效偏移距偏移剖面成像效果具有比较优势;陷落柱顶点、倾斜界面以及底边界能够清晰成像,没有画弧现象,陷落柱内部随机介质成像清晰.

4 实际数据试验

为了验证散射成像方法识别煤田陷落柱相对于反射地震的优势,我们在山西晋城某煤矿找到一条过已知开挖验证陷落柱的二维地震测线,通过常规纵波反射地震叠后偏移和本文提出方法成像效果的对比,说明了散射成像相比于反射地震的偏移是有优势的. 如图 6 所示,其中图 6a 是常规反射地震叠后偏移剖面,图 6b 是基于散射波的成像剖面. 在陷落柱的位置处(图中箭头指示),反射地震信号煤层反射连续,只煤层上下各存在不连续反射痕迹;而散射成像不仅可以精确刻画陷落柱所引起的不连续反

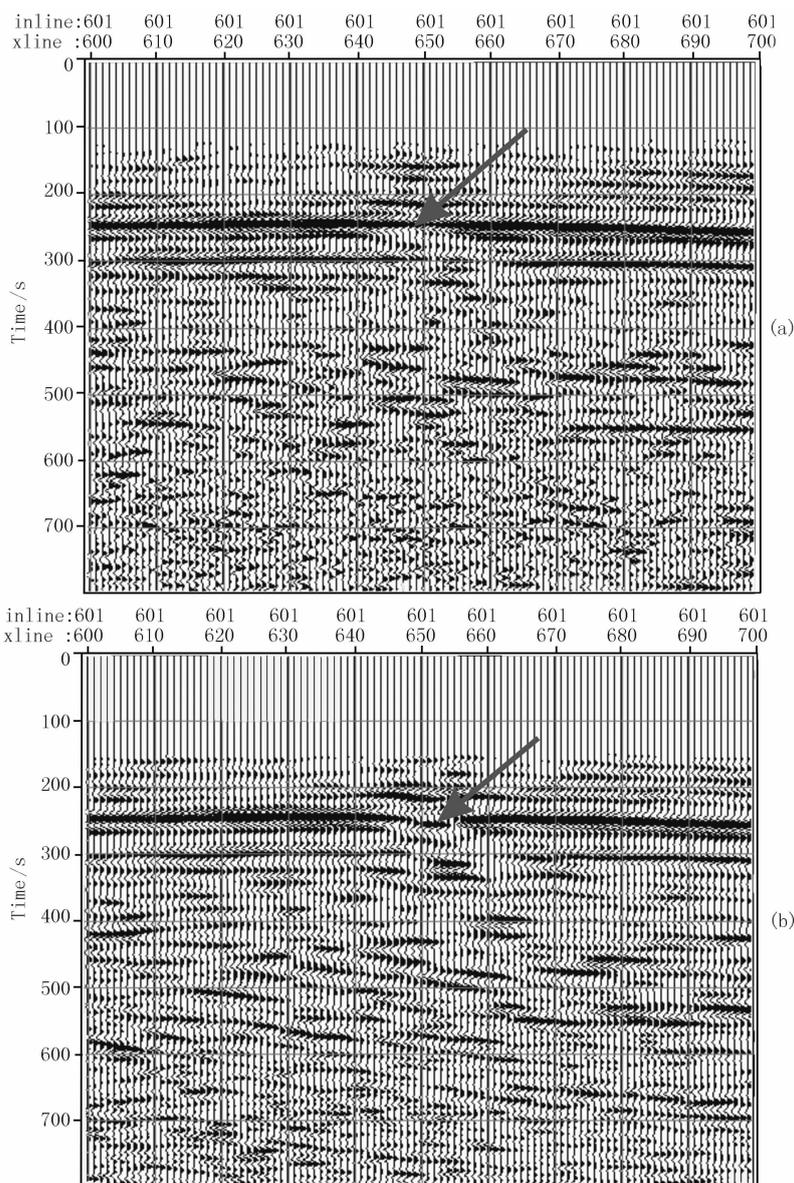


图 6 已知陷落柱的反射偏移(a)与散射成像(b)对比

Fig. 6 Contrast between reflect migration (a) and scattered imaging (b) of a sunken pillar

射,而且两侧柱面的形态及纵向延伸可以清晰地识别。

5 结 论

本文从散射波的角度讨论煤田陷落柱的成像问题,从波动方程出发对陷落柱模型进行了散射波正演模拟;并进一步对模拟和实际的数据应用等效偏移距方法进行偏移成像,获得以下认识:

(1) 在反射地震的盲区内;地面上能观测到陡倾角的散射波场,但散射波的能量主要集中于反射波射线方向。

(2) 陷落柱的相邻断陷点之间、以及相邻散射点之间的散射波存在相互干涉现象。

(3) CSP 道集具有很高的覆盖次数,能够提高信噪比,有利于弱散射信息的提取和叠加。

(4) CSP 道集等效于零偏移距自激自收剖面。通过 CSP 道集可以判断陷落柱等不均匀地质体的形态。

(5) 来自水平界面散射点的散射波能量强于陡倾界面散射点的散射波能量。

(6) 等效偏移距方法能够合理、准确地提取散射波场信息,基于等效偏移距叠前时间偏移方法是对陷落柱等不均匀地质体成像的有效方法之一。

参考文献 (References)

- [1] 张茂林,尹尚先.华北型煤田陷落柱形成过程研究.煤田地质与勘探,2007,35(6):26-29.
Zhang M L, Yin S X. Forming process of subsided column in coalfields of North China. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 2007, 35(6): 26-29.
- [2] 方 沛,王海龙.岩溶陷落柱成因分布规律浅析.煤炭工程,2008,(11):84-85.
Fang P, Wang H L. Karst in the fall of distribution of causes. *Coal Engineering* (in Chinese), 2008, (11): 84-85.
- [3] 尹尚先,武 强,王尚旭.华北煤矿区岩溶陷落柱特征及成因探讨.岩石力学与工程学报,2004,23(1):120-123.
Yin S X, Wu Q, Wang S X. Studies on characters and forming mechanism of karstic collapse columns at mine area of north China. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 2004, 23(1): 120-123.
- [4] Wang J M, Liu X W, Liu W S, et al. The inner circulation mechanism in sinking column formation in North China coal field—A case study in Fengfeng mining areas. *Journal of Coal Science & Engineering* (China), 2007, 13(1): 32-36.
- [5] 曹志勇,王 伟,杨德义等.煤田陷落柱波场模拟与分析.太原理工大学学报,2008,39(spec):841-843.

- Cao Z Y, Wang W, Yang D Y, et al. Coalfield subsided column wavefield modeling and analysis. *Journal of Taiyuan University of Technology* (in Chinese), 2008, 39 (spec): 841-843.
- [6] 曹志勇,杨德义.陷落柱的高斯射线束法模拟.中国煤炭地质,2008,20(6):63-65,69.
Cao Z Y, Yang D Y. Modeling of subsided column with Gaussian beam method. *Coal Geology of China* (in Chinese), 2008, 20(6): 63-65, 69.
- [7] 杨德义,王 赟,王 辉.陷落柱的绕射波.石油物探,2000,39(4):82-86.
Yang D Y, Wang Y, Wang H. Diffraction waves from fallen pillars. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2000, 39(4): 82-86.
- [8] 吴守华,周国兴,杨素霞等.陷落柱地震响应特征分析.煤田地质与勘探,2004,32(3):52-54.
Wu G H, Zhou G X, Yang S X, et al. Analysis for the seismic response characteristics of collapse column. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 2004, 32(3): 52-54.
- [9] 孟宪民,蒋维平.波阻抗反演技术及其应用效果.中国煤炭地质,2009,21(1):52-54.
Meng X M, Jiang W P. Elastic impedance inversion technology and its application effect. *Coal Geology of China* (in Chinese), 2009, 21(1): 52-54.
- [10] 宁建宏,张广忠.陷落柱的地震识别技术及其应用.煤田地质与勘探,2005,33(3):64-67.
Ning J H, Zhang G Z. Seismic identification technique and its application of collapse column. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 2005, 33(3): 64-67.
- [11] 杨晓东.三维地震勘探在构造复杂地区的应用.中国煤炭地质,2008,20(3):62-64.
Yang X D. Applied results of 3D seismic prospecting in shallow coal seam buried areas. *Coal Geology of China* (in Chinese), 2008, 20(3): 62-64.
- [12] 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.煤田地质与勘探,2008,36(1):62-65.
Cheng J Y, Wang X R, Guo X S, et al. 3D seismic processing for subsidence column detection applied in Dongpang coal mine. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 2008, 36(1): 62-65.
- [13] 黄联捷,吴如山.垂向非均匀背景多频背向散射层析成像.地球物理学报,1994,37(1):87-100.
Huang L J, Wu R S. Multifrequency backscattering tomography in a vertically varying background. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1994, 37 (1): 87-100.
- [14] 董其成,赵鸿儒.非均质矿体地震模型的衍射、转换波及次生波研究.地球物理学报,1994,37(2):228-238.
Dong Q C, Zhao H R. Diffraction, converted waves and derivative wave research of anisotropic geologic body by seismic model. *Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 1994, 37(2): 228-238.

- [15] 陶智勇. 弹性波逆散射微扰论. 地球物理学报, 2005, 48(4): 918-923.
Tao Z Y. Elastic wave inverse scattering perturbation theory. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2005, 48(4): 918-923.
- [16] Wu R S, Aki K. Scattering characteristics of elastic waves by an elastic heterogeneity. *Geophysics*, 1985, 50(4): 582-595.
- [17] Wu R S, Huang L J. Scattered field calculation in heterogenous media using a phase-screen propagator; Expanded Abstracts of the Technical Program. SEG 62nd Annual Meeting, 1992. 1289-1292.
- [18] Wu R S, Huang L J, Xie X B. Backscattered Wave calculation using the DE Wolf approximation and a phase-screen propagator; Expanded Abstracts of the Technical Program. SEG 65th Annual Meeting, 1995. 1293-1296.
- [19] Weglein A B, Gssparotto F A, Carvalho P M, et al. An inverse-scattering series method for attenuating multiples in seismic reflection data. *Geophysics*, 1997, 62(6):1975-1989.
- [20] Carcione J M, Herman G C, Ten Kroode A P E. Seismic modeling. *Geophysics*, 2002, 44(6):1304-1087.
- [21] 杜世通. 地震波动力学理论与方法. 东营: 中国石油大学出版社, 2008. 57-83.
Du S T. Seismic Wave Dynamics Theory and Methods. Dongying: Petroleum University Press, 2008. 57-83.
- [22] Innanen K A. Born series forward modelling of seismic primary and multiple reflections: an inverse scattering shortcut. *Geophys. J. Int.*, 2009, 177: 1197-1204.
- [23] Bancroft J C, Geiger H D. Equivalent offsets and CRP gathers for prestack migration. 64th. Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys. Expanded Abstracts, 1994. 672-675.
- [24] Bancroft J C, Wang S, Foltinek D S, et al. Common scatterpoint (CSP) prestack migration; CSEG National Convention. Expanded Abstracts, 1995. 47-48.
- [25] Bancroft J C, Geiger H D, Margrave G F. The equivalent offset method of prestack time migration. *Geophysics*, 1998, 63(6): 2042-2053.
- [26] 王伟, 尹军杰, 刘学伟等. 等效偏移距方法及应用. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1823-1830.
Wang W, Yin J J, Liu X W, et al. Equivalent offset method and its application. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(6): 1823-1830.

(本文编辑 刘少华)