



卫红学,查文锋,冯春龙.2014. 采空区上地震时间剖面的特征分析. 地球物理学进展,29(4):1808-1814,doi:10.6038/pg20140443. WEI Hong-xue,CHA Wen-feng,FENG Chun-long. 2014. Analysis of characteristics of seismic section in goaf area. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 29(4):1808-1814, doi:10.6038/pg20140443.

# 采空区上地震时间剖面的特征分析 Analysis of characteristics of seismic section in goaf area

卫红学<sup>1</sup>,查文锋<sup>2</sup>,冯春龙<sup>3</sup> WEI Hong-xue<sup>1</sup>,CHA Wen-feng<sup>2</sup>,FENG Chun-long<sup>3</sup>

- 1. 山西省地球物理化学勘查院,运城 044000
- 2. 阳泉煤业集团公司地测部,阳泉 045000
- 3. 太原理工大学矿业工程学院,太原 030024
- 1. The institute of geophysical and chemistry exploration of shanxi, Yuncheng 044000, China
- 2. The geological survey department of yangquan coal mining company, Yangquan 045000, China
- 3. Institute of mining engineering of taiyuan university of technology, Taiyuan 030024, China

摘 要 采空区在煤矿生产和地面施工勘探中危害严重. 在煤 矿生产和施工前探测采空区, 圈定出采空区的范围, 已成为当 前三维地震的一项十分总要的研究课题. 本文分析了采空区形 成的原因, 划分了不同的采空区类型. 通过应用 Tesseral-2D 全 波场地震模拟软件包对采空区进行正演模拟, 建立不同类型采 空区的地质模型, 在这些地质模型上模拟激发, 对所得到的时 间剖面的地震特征进行分析.

关键词 采空区;三维地震勘探;正演模拟

中图分类号 P631 文献标识码 A doi:10.6038/pg20140443 Abstract As everyone knows that the damage of gob area is serious in coal mine production and construction of ground. Detecting the gob area before the production and construction of the coal mine and Marking out the scope of the mined-out area has become an important research topic in the 3D seismic exploration. This paper analyzed the formation mechanism of the mined-out area and Divided the different kinds of mined-out area. The Seismic full-wave field modeling software Tesseral-2D was introduced into the forward modeling to the Seismic response of the goaf. This paper Set up geological model of different types of mined-out area, Stimulated on these geological models and analysed the characteristics of Seismic section.

Keywords goaf; 3D seismic exploration; forward simulation

## 0 引 言

在经济利益的驱使下,一度各地小煤窑疯狂的私采乱 挖,不仅扰乱了煤炭市场,破坏了生态平衡,而且给大型国有 煤矿的机械化生产带来诸多不便.更重要的是小煤窑采空区 的存在直接影响着大型矿井的安全.在煤矿事故中,小窑采 空区透水造成的事故高于瓦斯、顶板冒落等其他事故.例如 2008年4月7日,重庆市能投集团中梁山煤电气有限公司彭 水芦塘煤矿透水事故,造成9人死亡.再如2010年3月28 日,山西省王家岭煤矿透水事故,造成38人死亡.正因这些 惨痛的经历,使我们认识到在煤矿施工生产前提前查明采空 区的大小和位置的急切性和重要性.

本文主要利用 Tesseral-2D 全波场地震模拟软件包对采 空区进行正演模拟,建立不同类型采空区的地质模型,在这 些地质模型上模拟激发,对所得到的时间剖面的地震特征进 行分析.分析采空区处的地震特征与标准煤层处的地震特征 的差异.

## 1 采空区的类型划分

采空区主要指的是煤层开采和巷道掘进后留下的空间 区域.由于煤层埋深不同、厚度不同、开采时间的不同、顶底 板地层岩性的不同、开采方式的不同以及其他因素的影响, 使得采空区的赋存呈现不同的形式.

当煤层采空时,原有的地应力平衡受到破坏,为了使地 应力重新达到平衡,上覆原有地层将不同程度的发生位移错 动、出现裂缝或者发生坍塌等现象.如果煤层埋藏较浅,煤层 较薄,开采时间很长,机械化程度高,回采率高,且范围较大, 顶板岩性比较坚硬塑性较差时,采空区上覆岩层会发生坍 塌、冒落,垂直方向上形成所谓的"三带",即弯曲带、断裂带、 垮落带(王超凡等,1998;武磊彬和徐奭,2009;郭念民和吴国

**收稿日期** 2013-11-22; 修回日期 2014-05-01. 投稿网址 http://www.progeophys.cn

作者简介 卫红学,男,山西省运城市、硕士、从事三维地震勘探理论与应用研究.(E-mail:845320801@qq.com)

忱,2012).反之,采空区将以空洞(充水、充气、水气共存)的 形式存在.如果采空区开采时间较长,区域内降水较多,地表 河流、湖泊环绕,此时地表水顺着地层裂隙不断向采空区渗 人,或者地下水活跃,不断侵蚀流动贯通采空区,这样长久以 来采空区将会赋存大量的积水.如果水流影响较小,采空区 将会以充气的形式存在,或者水气共存.

## 2 三维地震勘探探测采空区的原理及正演模拟 原理

## 2.1 三维地震勘探探测采空区的原理

三维地震探测采空区主要使用的是反射波法勘探,它依据的是不同的均匀连续介质间的波阻抗差异(介质的密度与 波在介质中传播的速度).当介质间的波阻抗差异越大,反射 波的能量越强,反之波阻抗差异越小,反射波的能量越弱(程 建远等,2008;张广忠等,2009;王润秋等,2010).

当煤层未开采时,由于煤层呈现低频、低密度、低速度的 特性,与顶底板围岩的波阻抗差异较大,能形成能量较强的 反射波(标准煤层反射波).

当煤层被开采后,原有的地层物性条件发生破坏,使介 质间的连续性发生破坏,长久以来人们认为在这样的条件 下,地震波是无法传到采空区以下的地层,地面上也无法接 收到有效的反射波,即所谓的地震勘探盲区.盲区的提出主 要依据的是把采空区看成真空介质,地震波在真空中无法传 播(裴文春等,2007;裔传标等,2008;张元高等,2011;王晶 等,2012).事实上采空区不是绝对意义上的真空,采空区充 填有松散塌陷物、水、气等.这样的充填物与顶底板围岩也存 在着一定波阻抗差异,能形成有效的反射波.通过分析采空 区内充填物与围岩形成的反射波特性,以及采空区周围煤层 与围岩形成的反射波特性,比较二者的差异,圈定出采空区 的边界及范围.

#### 2.2 正演模拟原理及方法

本文采用的 Tesseral 2-D 全波场模拟软件包就是一种 基于有限差分法的软件,提供五种类型的波动方程正演算 法,波动方程模拟法着重考虑地震波的动力学性质,通过求 解地震波波动方程建立地震波场从而得到所要研究的一些 地质现象的波场特征,这种方法能够更为逼真地模拟得到地 下复杂构造的地震波场特征.

2.2.1 有限差分法

有限差分法就是把要求解的区域划分为差分网格,然后 利用有限的网格节点代替连续的求解区域,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. 地震波场的数值模拟是建立在地震波的波动理论的 基础上的,用有限差分法解波动方程时,应当对变量做离散 化处理,即对连续的物理量仅考虑其离散空间位置和离散时 间. 对于一个单变量的函数 *f*(*X*),将其离散化,那么在采样 点 *X*=*l*Δ*X* 的采样值就是 *f*(*l*Δ*X*),其中,Δ*X* 表示步长,*l* 表 示整数.则在有限差分法中 *f*(*X*)在该采样点的导数可以表 示为

$$\frac{\mathrm{d}f(x)}{\mathrm{d}x} \approx \sum_{m=-N}^{N} a_n f(x + m\Delta x) , \qquad (1)$$

式中,an 是系数,N 是差分格式的长度,差分格式由这两个

系数来定,在实际中经常用到的差分格式包括向前差分,向 后差分以及中心差分.

2.2.2 波动方程的建立

建立波动方程是在已知物体形状、位置、弹性常数以及 外力分布情况等参数的条件下求出物体的位移、应力以及应 变的分布,主要包括以下几个部分.

(1)应力平衡方程

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial z} + f(x) = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial z} + f(y) = 0 , \qquad (2) \\ \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + f(z) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \end{cases}, \qquad (3) \\ \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{cases}$$

(2)应力与应变的关系为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}_{xx} = \lambda \theta + 2\mu \boldsymbol{\varepsilon}_{xx} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{yy} = \lambda \theta + 2\mu \boldsymbol{\varepsilon}_{yy} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{zz} = \lambda \theta + 2\mu \boldsymbol{\varepsilon}_{zz} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{zy} = 2\mu \boldsymbol{\varepsilon}_{zy} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{yz} = 2\mu \boldsymbol{\varepsilon}_{zy} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{xz} = 2\mu \boldsymbol{\varepsilon}_{yz} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{xz} = 2\mu \boldsymbol{\varepsilon}_{xz} \end{cases}, \tag{4}$$

将公式4代入公式3可得:

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \lambda \theta + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_{xy} = \lambda \theta + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_{xz} = \lambda \theta + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \\ \varepsilon_{xy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \varepsilon_{yz} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \varepsilon_{yz} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \varepsilon_{xz} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{cases}$$
(5)

方程 5 是物体在平衡状态下的应力平衡方程,当物体处于不 平衡状态时,方程变为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + f(x) = \rho + \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + f(y) = \rho + \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + f(z) = \rho + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{cases}$$
(6)

在二维模拟时,只需考虑 *x* 和 *z* 两个方向的位移分量, 这时可以将方程 6 转换为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f(x) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right] \\ \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f(z) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right] \end{cases}, (7)$$

当 f(x)=f(z)=0 时,上面的方程可以进一步变为:

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)+2\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)=\rho\frac{\partial^{2}u}{\partial t^{2}}\right], \\
\left(\frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)+2\mu\frac{\partial u}{\partial z}\right]+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)=\rho\frac{\partial^{2}u}{\partial t^{2}}\right], \\
\left(\frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)+2\mu\frac{\partial u}{\partial z}\right]+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)=\rho\frac{\partial^{2}u}{\partial t^{2}}\right], \\
\left(\frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)+2\mu\frac{\partial u}{\partial z}\right]+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)=\rho\frac{\partial^{2}u}{\partial t^{2}}\right], \\
\left(\frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)+2\mu\frac{\partial u}{\partial z}\right]+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)+2\mu\frac{\partial u}{\partial z}\right], \\
\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)=\rho\frac{\partial^{2}u}{\partial t^{2}}\right], \\$$
(8)

式 8 就是二维非均匀介质的弹性波方程,在均匀介质中,λ、μ 和ρ均为常数,方程可以进一步简化为:

$$\begin{cases} (\lambda+2\mu)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial z}\right)+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}-\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial z}\right)=\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\\ (\lambda+2\mu)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial z}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial s^2}-\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial z}\right)=\rho\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{cases},$$
(9)

将9式中的 x 和 z 分量进行合并后就得到二维均匀介质弹 性波方程的矢量形式:

$$\rho \frac{\partial^2 \overline{U}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) grad\theta + \mu \nabla^2 \overline{U}.$$
(10)

2.2.3 有限差分方程的建立

假设二维波动方程可以表示为

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{1}{U^2} \frac{\partial U^2}{\partial t^2} + s(x, z, t), \qquad (11)$$

式中,U=U(x,z,t)表示声压,V表示声波在介质中的传播 速度, *ρ*表示密度, *s*(x,z,t)表示震源函数.

假设U=U(x,z,t),其中 $\Delta x$ , $\Delta z$ 是空间间隔, $\Delta t$ 是时间 间隔,用k表示时间方向的离散网格,m和n分别表示x方 向和z方向的离散网格,利用泰勒级数展开式将 $U_{m,n}^{k+1}$ 在  $U_{m,n}^{k}$ 中展开可得:

$$U_{m,n}^{k+1} = U(x,z,t+\Delta t) = U_{m,n}^{k+1} + \Delta t \left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_{m,n}^{k} + \frac{1}{2} \Delta t^{2} \left(\frac{\partial^{2} U}{\partial t^{2}}\right)_{m,n}^{k} + \frac{1}{6} \Delta t^{3} \left(\frac{\partial^{3} U}{\partial t^{3}}\right)_{m,n}^{k} + \Lambda + O(\Delta t^{4}) , \qquad (12)$$

同理,利用泰勒级数展开式将U<sup>k-1</sup>在U<sup>k</sup><sub>m,n</sub>中展开可得:

$$U_{m,n}^{k+1} = U(x, z, t - \Delta t) = U_{m,n}^{k} - \Delta t \left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_{m,n}^{k} + \frac{1}{2} \Delta t^{2} \left(\frac{\partial^{2} U}{\partial t^{2}}\right)_{m,n}^{k} - \frac{1}{6} \Delta t^{3} \left(\frac{\partial^{3} U}{\partial t^{3}}\right)_{m,n}^{k} + \Lambda + O(\Delta t^{4}) , \qquad (13)$$

用式 2-12 和式 2-13 做差,即可推导出关于 t 的一阶中心差 分形式为

$$\left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_{m,n}^{k} = \frac{U_{m,n}^{k+1} - U_{m,n}^{k-1}}{2\Delta t} , \qquad (14)$$

将式 12 和式 13 相加,可以得到:

$$U_{m,n}^{k+1} + U_{m,n}^{k-1} = 2U_{m,n}^{k} + \Delta t^{2} \left(\frac{\partial^{2} U}{\partial t^{2}}\right)_{m,n}^{k} + O(\Delta t^{4}) , \qquad (15)$$

进一步可以推导得出关于 t 的二阶中心差分为  

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

同理,也可以推导出关于 x,z 的中心差分格式:

(1)关于 x 的一阶中心差分形式为  

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_{m,n}^{k} = \frac{U_{m+1,n}^{k} - U_{m-1,n}^{k}}{2\Delta x}$$
, (17)

(2)关于 x 的二阶中心差分形式为  

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_{m,n}^k = \frac{U_{m+1,n}^k - 2U_{m,n}^k + U_{m-1,n}^k}{\Delta x^2}$$
, (18)

(3)关于 z 的一阶中心差分形式为  

$$\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)_{m,n}^{k} = \frac{U_{m,n-1}^{k} - U_{m,n-1}^{k}}{2\Delta z}$$
, (19)

(4)关于 x 的二阶中心差分形式为

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)_{m,n}^k = \frac{U_{m,n+1}^k - 2U_{m,n}^k + U_{m,n-1}^k}{\Delta x^2} , \qquad (20)$$

若令  $\Delta x = \Delta z = h$ ,根据以上的关于 x,z,t 的中心差分方程就可以得到二维波动方程的有限差分方程为

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \end{pmatrix}_{m,n}^k + \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \end{pmatrix}_{m,n}^k = \frac{U_{m+1n}^k - 2U_{m,n}^k + U_{m-1,n}^k}{\Delta x^2} + \\ \frac{U_{m,n+1}^k - 2U_{m,n}^k + U_{m,n-1}^k}{\Delta z^2} \\ = \frac{U_{m+1,n}^k - 2U_{m,n}^k + U_{m-1,n}^k + U_{m,n+1}^k - 2U_{m,n}^k + U_{m,n-1}^k}{h^2} \\ = \frac{1}{V^2} \frac{U_{m,n}^{k+1} - 2U_{m,n}^k + U_{m,n}^{k-1}}{\Delta t^2} ,$$
(21)

对上式继续进行推导可得:

$$U_{m,n}^{k+1} = 2U_{m,n}^{k+1} - U_{m,n}^{k-1} + V^{2} \frac{\Delta t^{2}}{h^{2}} (U_{m+1,n}^{k} - 2U_{m,n}^{k} + U_{m,n+1}^{k} - 2U_{m,n}^{k+1} + U_{m,n+1}^{k}) = 2(1 - 2B^{2})U_{m,n}^{k} - U_{m,n}^{k-1} + B^{2} (U_{m+1,n}^{k} + U_{m,n+1}^{k} + U_{m,n-1}^{k}) , \qquad (22)$$

其中, $B=V\frac{\Delta t}{h}$ ,上式就是二阶波动方程的有限差分格式.

## 3 正演模拟分析

本次正演模拟主要分析采空区内水与气的关系,建立了 5个地质模型,分别为:煤层未开采模型、采空区全充水模型、采空区内水多气少模型、采空区内水气各半模型、采空区 内水少气多模型、采空区全充气模型.通过对这5个地质模 型激发产生的时间剖面进行比较分析,找出采空区的边界.

本次正演模拟建立了四层地层,分别为第四系地层、砂 岩、煤层、砂岩.具体参数见表 1.

表 1 模型地层参数表 Table 1 The parameters table of model formation

地层	纵波速度 (m/s)	横波速度 (m/s)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	地层厚度 (m)
第四系	1600	950	1978	20
砂岩	3800	2194	2320	380
煤层	2100	1210	2048	10
空气/水	500/1400	150/0	1162/1000	见各个模型
砂岩	3900	2252	2335	400

#### 3.1 模型 I-煤层未开采模型

在这个模型中,模型横向延伸800 m,纵向延伸800 m,



800

200

300

400

(采空区水少气多,水厚3m,气厚7m)

Fig. 10 Simulation record of single shot (with

less water and much gas, 3 meters in thickness of water,7 meters in thickness of gas)

400

goaf with gas filling, 10 meters in thickness)

500 600 700

500

600



水少气多,水厚3m,气厚7m) Fig. 9 The large geological model (with less water and much gas, 3 meters in thickness of water,7 meters in thickness of gas)



Fig. 11 Simulation record of single shot (the goaf with gas filling, 10 meters in thickness)



图 13 采空区时间剖面 Fig. 13 The goaf of the seismic section

煤层埋深 400 m,厚度 10 m,地震子波采用的是主频为 100 赫兹的 Rikker 子波,其它地层参数同表 1,地质结构模型示 意图见图 1.

通过采用弹性波动方程模拟激发得到的单炮记录,见 图 2.

通过计算得知,0.2 ms 到 0.3 ms 之间那两条连续性较

好的反射波为煤层反射波.从图中可看出,煤层与顶底的砂 岩,形成的反射波能量强,波组特征明显.

### 3.2 模型Ⅱ-采空区全充水模型

这个模型与模型 | 的区别是煤层中局部存在采空区,采 空区内全充满水. 采空区的横向延伸为 300 m 到 500 m,纵 向延伸为 400 m 到 410 m,厚度 10 m,其它地层参数同表 1,

地质结构模型示意图见图 3.

通过采用弹性波动方程模拟激发得到的单炮记录,见图 4.

从图 4 中可以看出在煤层未开采部分煤层反射波能量 大小基本相同,在 300 m 与 500 m 之间的采空区部分能量明 显加强,频率降低,且存在着时间延迟现象(由于采空区充 水,波速降低),另外在 0.33 ms 左右处有一条多次反射波, 该多次波在 300 m 到 500 m 处采空区正下方中断,其他部分 特征明显.在采空区正下方 0.45 ms 处(横向上 300 m 到 500 m之间)出现局部能量较强的全程二次反射波(由于采空 区存在形成的多次波),这在模型 I 中是不存在的.

#### 3.3 模型Ⅲ-采空区内水多气少

这个模型中采空区内存在 70%的水与 30%的空气,空 气埋深 400 m 到 403 m,水埋深 403 m 到 410 m,其它地层参 数相同见表 1. 地质结构模型示意图见图 5.

通过采用弹性波动方程模拟激发得到的单炮记录,见图 6.

从图 6 中可以看到,单炮记录与全充水是的单炮记录类 似,不同之处是煤层反射波在 300 m 与 500 m 之间的采空区 内能量更强,频率更低,延迟现象也更明显.在 0.33 ms 左右 处的多次反射波振幅特征更强(300 m 到 500 m 之间多次波 确实),采空区下方 0.45 ms 处的全程二次反射段能量更强.

## 3.4 模型Ⅳ-采空区内水气各半

该模型中采空区内水与空气的体积各占一半,空气埋深 400 m 到 405 m,水埋深 405 m 到 410 m,其它地层参数相同 见表 1. 地质结构模型示意图见图 7.

通过采用弹性波动方程模拟激发得到的单炮记录,见图 8.

从图 8 中可看出单炮记录与模型Ⅳ的单炮记录相似,不同之处是煤层 300 m 与 500 m 之间的采空区的能量更强,频率更低,延迟现象也更明显,0.33 ms 处的多次波更明显(300 m 到 500 m 之间多次波缺失),采空区正下方 0.45 ms 处的局部全程二次反射段能量更强.

#### 3.5 模型 V-采空区水少气多

这个模型中,水占 30%,空气占 70%,空气埋深 400 m 到 407 m,水埋深 407 m 到 410 m,其它地层参数相同见表 1.地质结构模型示意图见图 9.

通过采用弹性波动方程模拟激发得到的单炮记录,见图 10.

从图 10 中可看出单炮记录与模型Ⅳ的单炮记录相似, 不同之处,300 m 与 500 m 之间的采空区的能量更强,频率 更低,延迟现象也更明显,0.33 ms 处的多次波更明显(300 m 到 500 m 之间多次波缺失),采空区正下方 0.45 ms 处的 局部全程二次反射段能量更强.

#### 3.6 模型 Ⅵ-采空区全空气

在这个模型中采空区全充气,其他地层条件见它地层参数相同见表 1. 地质结构模型示意图见图 11.

通过采用弹性波动方程模拟激发得到的单炮记录,见图 12.

通过图 12 可知,采空全充气时,能量更强,频率更低,延迟现象也更明显,0.33 ms处的多次波更明显(300 m 到 500

m之间多次波缺失),采空区正下方 0.45 ms 处的局部全程 二次反射段能量更强.

通过对以上 6 个模型的单炮记录对比可知,当煤层未开 采时,由于煤层与围岩的波组抗差异,能够形成能量较强,波 组特征明显的反射波,当煤层挖空,留下采空区时,采空区处 的反射波与两边的煤层形成的反射波比相比,能量变强(振 幅增强),频率变低,另外采空区的存在也会形成多次反射 波,在 0.33 ms 左右处的多次波在 300 m 到 500 m 的采空区 之间能量缺失,在 0.45 ms 处形成的全程二次波在 300 m 到 500 m 之间能量加强.随着采空区内的充填物质的不同,能 量变化也不同.全充水时的能量比全充气时的能量低(振幅 变弱),频率高,随着采空区内积水的不断减少,空气的不断 增加,能量越来越强,频率越来越低,延迟越来越明显,采空 区下部的局部反射段能量也越来越强(杨双安和宁书年, 2004;段建华等,2010;刘岩,2008).

## 4 实例分析

在前面正演模拟中,采空区与煤层未开采时的地震波场 相应特征比较,反射波的能量随充填物质的不同而出现强弱 的不同,充水与充气时,散射波的能量强频率低,并且出现时 间延迟现象.

山西煤炭进出口集团有限公司左权宏远煤矿为了查明 该区煤层采空区及构造赋存情况,对该勘探区进行了三维地 震勘探.井田内15#煤层为全区稳定主要可采煤层,它是本 次地震勘探的主要目的波,是地质解释的主要依据.

经过野外认真施工和室内精细处理,解释采空区三处, 如图 13 所示,从地震时间响应剖面上可以看出,采空区处能 量变强,频率变低,出现时间延时现象.

## 5 结 论

通过 Tesseral-2D 全波场地震模拟软件包对采空区进行 正演模拟可知,采空区中的反射波和未开采地段的煤层反射 波在波的能量(振幅)、频率、时间延迟方面存在着明显的区 别.另外采空区内随着充填物质的不同,反射波表现出的能 量(振幅)、频率、时间延迟也不同(冯子辉等,2011;陈相府 等,2005).这为采空区在时间剖面上的识别提供了简单的判 别依据,对煤矿的安全生产及防治水有一定的指导意义.

致 谢 感谢审稿专家和编辑部老师的指导和帮助.

#### References

- Chen X F, An X F, Wang G W. 2005. Application of high resolution seismic detecting for undermined shallow strata[J]. Progress in Geophysics, 20(2): 381-386.
- Cheng J Y, Zhang G Z, Li L Y, *et al.* 2003. A new seismic technique to explore goafs and its application prospects[J]. Coal Geology of China, 15(5): 50-53.
- Cheng J Y, Sun H X, Zhao Q B, *et al.* 2008. The detection technology of excavated region in coal mine and case study[J]. Journal of China Coal Society, 33(3): 251-255.
- Duan J H, Yang W Q, Ni X H. 2010. Application Of 3D seismic technology on coalmine "Cavity-shaped"Gob area detection[J]. Coal Geology of China, 22(8): 21-25.

- Feng Z H, Zhu Y K, Zhang Y G, et al. 2011. The seismic response of the volcanic edifice-facies zone of Yingcheng formation in the Songliao Basin[J]. Chinese Journal Geophysics, 54(2): 556-562, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.035.
- Guo N M, Wu G C. 2012. Forward-modeling and feasibility study of non-repeating acquired time-lapse seismic exploration [J]. Progress in Geophysics, 27(1): 232-245, doi:10.6038/j.issn. 1004-2903.2012.01.026.
- Liu Y. 2008. Seismic survey method of goaf[J]. Coal Technology, 27(4) 100-102.
- Wang J, Zhang J Zu, Fan Q R, et al. 2012. Application of comprehensive geophysical prospecting technology in prospecting complex gob in integrated coal mine [J]. Coal Mining Technology, 17(4): 21-24.
- Pei W C, Wang D M, Cheng Z Q, et al. 2007. Explanation technology of 3D earthquake information to analyze seam washing away and goaf status [J]. Coal Science and Technology, 35(8): 32-34.
- Wang C F, Zhao Y G, Jin H X, et al. 1998. Seismic tomography and its application to the investigation of buried worked-out area [J]. Chinese Journal Geophysics, 41(S1): 367-375.
- Wang R Q, Li L L, Li H J. 2010. Forward modeling research for seismic exploration of Tarim area [J]. Chinese Journal Geophysics, 53 (8): 1875-1882, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.013.
- Wu L B, Xu S. 2009. Applied effect of prestack time migration technology in 3D seismic exploration at a coal mine of Huaibei [J]. Progress in Geophysics, 24(6): 2267-2273.
- Yang S A, Ning S N. 2004. Research on seismic surveying goafing of the old mine[J]. Coal Geology of China, 16(1): 44-47.
- Yi C B, Zhu S J, Sun Y L, et al. 2008. Application of 3D Seismic exploration technology in Prospecting of goaf area [J]. Coal Technology, 27(4): 88-91.
- Zhang G Z, Zhang Y C, Li C H, et al. 2009. 3D seismic exploration technology for lower coal group in gob area[J]. Coal Geology & Exploration, 37(1): 66-71.
- Zhang Y G, Liu J Y, Xin C K, et al. 2011. A discussion on the development features of intermittent volcanic Shahezi formation and the existence of volcanic edifice in Xujiaweizi depression [J]. Chinese Journal Geophysics, 54 (2): 474-480, doi: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 02. 026.

## 附中文参考文献

陈相府,安西峰,王高伟. 2005. 浅层高分辨地震勘探在采空区勘

测中的应用[J]. 地球物理学进展, 20(2): 381-386.

- 程建远,张广忠,李林元,等. 2003. 老窑采空区地震探测新技术及 其应用前景[J]. 中国煤田地质, 15(5): 50-53.
- 程建远,孙红星,赵庆彪,等. 2008. 老窑采空区的探测技术与实例 研究[J]. 煤炭学报, 33(3): 251-255.
- 段建华,杨文强,倪新辉.2010. 三维地震技术在探测煤矿腔状采 空区中的应用[J]. 中国煤炭地质,22(8):21-25.
- 冯子辉,朱映康,张元高,等. 2011. 松辽盆地营城组火山机构-岩相带的地震响应[J]. 地球物理学报,54(2):556-562, doi:10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 02. 035.
- 郭念民,吴国忱. 2012. 非重复采集时移地震正演模拟及可行性分析[J]. 地球物理学进展,27(1):232-245, doi:10.6038/j.issn. 1004-2903.2012.01.026.
- 刘岩. 2008. 采空区上的地震勘探方法[J]. 煤炭技术, 27(4): 100-102.
- 王晶,张建州,范庆荣,等. 2012. 综合物探技术在整合煤矿复杂采 空区勘探中的应用[J]. 煤矿开采,17(4):21-24.
- 裴文春,王德民,程增庆,等.2007. 三维地震资料解释技术分析煤 层冲刷及采空区[J]. 煤炭科学技术,35(8):32-34.
- 王超凡,赵永贵,靳洪晓,等. 1998. 地震 CT 及其在采空区探测中 的应用[J]. 地球物理学报,41(S1):367-375.
- 王润秋, 李兰兰, 李会俭. 2010. 塔里木地区勘探地震正演模拟研究[J]. 地球物理学报, 53(8): 1875-1882, doi:10.3969/j.issn. 0001-5733.2010.08.013.
- 武磊彬,徐奭. 2009. 叠前时间偏移技术在淮北某煤矿采区三维地 震勘探中的应用与效果[J]. 地球物理学进展,24(6): 2267-2273.
- 杨双安, 宁书年. 2004. 老窑采空区的地震探测与研究[J]. 中国煤 田地质, 16(1): 44-47.
- 裔传标,朱书阶,孙永亮,等. 2008. 三维地震勘探技术在老窑采空 区探测中的应用[J]. 煤炭技术, 27(4): 88-91.
- 张广忠,张运成,李长河,等. 2009. 煤矿采空区下组煤三维地震勘 探技术[J]. 煤田地质与勘探, 37(1): 66-71.
- 张元高,刘继莹,辛朝坤,等. 2011. 徐家围子断陷火山间歇期沙河 子组发育特征及其存在火山机构的探讨[J]. 地球物理学报,54 (2):474-480, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.026.