

# 基于地震反射波法的巷道空间地质异常体超前探测

方杰<sup>1,2</sup>, 徐会军<sup>2</sup>, 孔广亚<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国神华能源股份有限公司科技发展部, 北京 100011)

**[摘要]** 论述了地震反射波超前探测的3个核心技术, 即反射波提取、速度分析和偏移成像, 针对某矿胶带巷掘进过程中多次遇见小断层或破碎带等异常地质体, 采用地震反射波超前探测法在胶带巷迎头后方实施超前探测。根据探测结果, 推测出掘进面前方一定范围内隐伏地质异常体的位置和范围, 对探测结果进行追踪验证, 实际揭露情况与探测结果基本吻合。

**[关键词]** 反射波法; 异常构造; 反射波超前探测; 偏移成像

**[中图分类号]** TD15; P631.4 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1006-6225(2015)04-0028-04

## Advanced Exploration of Space Geological Anomalous Body in Roadway Based on Seismic Reflected Wave Method

巷道超前探测技术一直是地球物理界普遍关注的热点和难题, 其重点是指在观测点向前方探测尚未揭露的地质构造及其异常<sup>[1]</sup>。煤炭开采中, 掘进前方事先未预测到的隐伏地质构造会严重影响巷道全局布置与掘进工作的顺利进行。目前国内外重点研究的是巷道前方富含水异常空间和断层构造面位置的探测, 技术手段通常为瞬变电磁法和地震反射波法。由于巷道内存在各种电信号干扰源, 且探测施工空间有限, 瞬变电磁法的优势得不到发挥, 以致探测结果往往难以达到技术要求。结合以往研究资料表明, 地震反射波技术原理成熟, 接收的信号信噪比高, 是一种探测距较远, 现场使用便捷且可靠的物探手段<sup>[2-5]</sup>。

利用地震反射波探测前方地质异常主要是探测强波阻抗界面, 煤矿中可以在穿层巷道中探测前方含水灰岩、煤层、岩墙等界面, 也可以在顺层巷道中探测前方断层、尖灭点、构造破碎带、陷落柱等的位置。

### 1 反射波法超前探测原理

矿井巷道反射波超前探测技术主要应用地震波在传播过程中遇到煤岩体物性界面会发生反射的原理。如图1所示, 该技术充分利用巷道有限空间, 设计沿巷道后方布置传感器、震源来探测巷道前方地质条件的观测系统。一般用锤击或小药量爆破作为震源, 震源沿巷道左(右)帮平行底板成直线排列。地震波在煤岩体中以球面波形式传播遇到煤岩物性界面时会发生反射, 反射回来的地震信号被

地震检波器接收并形成地震记录。运用地震波动力学和运动学原理, 分析地震记录波形特征, 以推测断层、岩石破碎带等不良地质体的位置和规模, 并计算相关岩石力学参数和提取煤岩性界面。

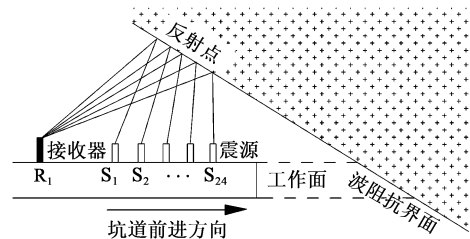


图1 巷道空间反射波超前探测原理示意  
反射波超前探测法核心技术如下:

(1) 反射波提取 掘进巷道超前探测关注的是介质的水平变化情况。为了从地震记录中获得巷道前方反射波信息, 在数据处理过程中需要将上下行波分离并保留下行波(负视速度), 本质上就是压制来自测线垂向上的信息而保留来自水平方向上的反射信息。采用线性 Radon 变换技术进行上下行波分离, 从而来提取反射波信息。当选择线性  $\tau-p$  变换进行上下行波分离时, 已经假设介质是水平变化的且速度界面和测线垂直。 $\tau-p$  变换可以将波场从  $t-x$  域转换到  $\tau-p$  域, 波场参量有如下关系:

$$\begin{cases} t = \tau + px \\ p = dt/dx \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $t$  为域中的波旅行时间;  $x$  为炮检距;  $p$  为射线变量;  $\tau$  为射线变量在时间轴上的截距。

$\tau-p$  变换正变换是把  $\tau-x$  域中共炮点记录或

[收稿日期] 2014-12-18

[DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2015.04.008

[作者简介] 方杰(1984-), 男, 陕西神木人, 博士研究生, 工程师, 从事矿井地质及防治水研究。

[引用格式] 方杰, 徐会军, 孔广亚. 基于地震反射波法的巷道空间地质异常体超前探测[J]. 煤矿开采, 2015, 20(4): 28-31.

其他记录按不同的斜率  $p$  和截距  $\tau$  进行迭加。正变换过程为

$$\psi(\tau, p) = \sum_i^N \varphi(x_i, \tau + px_i) \quad (2)$$

式中,  $N$  为  $t-x$  域中地震道数, 按给定的斜率  $p$ , 沿射线  $t = \tau + px_i$  迭加记录的所有道, 即形成  $\tau-p$  域的一个地震道; 按某一斜率范围, 叠加起来形成  $\tau-p$  域的一组完整地震道记录。

经转换后各种波的波场特征在  $\tau-p$  域中发生分离, 以识别在  $t-x$  域中无法识别的负速度场。图 2 说明了  $\tau-p$  变换的过程。

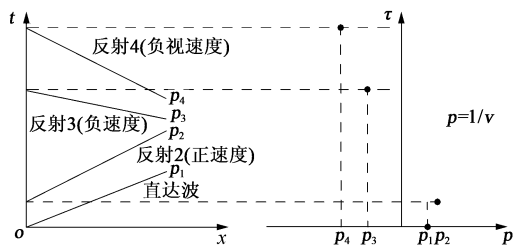


图 2  $\tau-p$  变换过程示意

(2) 速度分析 速度分析是地震数据处理中很重要的一环, 尤其当遇到大倾角地层, 断层发育带等复杂构造时, 准确的偏移速度就成为做好深度偏移的关键。速度分析的作用主要体现在: 提供准确的叠加速度, 提高并改善地震数据信噪比和多次叠加剖面的质量; 为偏移叠加及时深转换提供速度依据。速度分析的偏差会给后面的处理带来遗传误差, 因此各向异性介质中速度分析的研究显得越来越重要。

(3) 偏移成像技术 以射线偏移为基础、使反射波自动归位到真实位置上的绕射扫描偏移方法在巷道超前探工程中越来越实用。惠更斯原理认为地下每一个反射点  $p$  都可以看做是一个子波震源, 把每一个网格点看成是一个反射点进行绕射扫描偏移时, 其绕射波或反射波旅行时间为:

$$t_{ij} = \frac{1}{v} [\sqrt{h^2 + (x_p - x_{s_i})^2} + \sqrt{h^2 + (x_{R_j} - x_p)^2}] \quad (3)$$

式中,  $t_{ij}$  为扫描点  $p$  处第  $i$  炮第  $j$  个接收点的绕射波旅行时间,  $j = 1, 2, \dots, m$ , 且  $m$  为参加叠加的记录道;  $v$  为地震波的速度;  $h$  为  $p$  点的垂直深度。

图 3 为绕射扫描偏移网格, 将记录道上  $t_{ij}$  时刻的振幅值  $a_{ij}$  与  $p$  点的振幅值叠加起来, 即为  $p$  点的总振幅值  $A_i$ , 则  $A_i = \sum_{j=1}^M (a_{ij})p$ 。

计算  $x-h$  平面上按  $\Delta x$ 、 $\Delta h$  划分的网格上每一点  $p(x, h)$ , 当网格划分得足够细时, 就可以确定反射点的全部可能位置。如此, 反射界面上的叠加扫描点  $p$  的总振幅  $A_i$  更加增大, 不在反射界

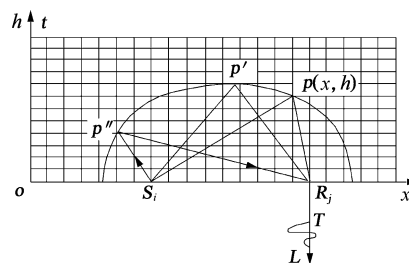


图 3 绕射扫描偏移网格划分

面上的扫描点  $p$  的总振幅  $A_i$  进一步减小, 这样提高了信噪比同时, 又将反射界面自动偏移 to 真实空间位置上去。处理时常需控制扫描范围来对每一个炮检对进行振幅叠加, 以提高运算速度<sup>[6-8]</sup>。

## 2 现场探测实例

### 2.1 工程背景

某矿 (4-5) 04 工作面井下标高 700 ~ 777m, 工作面巷道沿底板掘进, 4-5 煤层稳定, 厚度 5.5 ~ 7.1m, 顶板为富水性粉细砂岩, 底板多为泥岩、粉砂岩。工作面为单斜构造, 倾向角度  $19^\circ$ , 掘进期间揭露多条断层, 落差 0.9 ~ 8.8m。胶带巷 (下巷) 掘进至距联络巷 600m 位置时, 发生冲击事件, 冲击造成迎头顶板冒落, 巷帮炸帮, 严重影响掘进作业。针对该次冲击显现情况, 结合已经揭露断层, 推测掘进范围内可能有不良构造的影响, 为探明掘进范围内的隐伏构造, 决定在胶带巷掘进头开展反射波超前探测, 设计的探测范围见图 4。

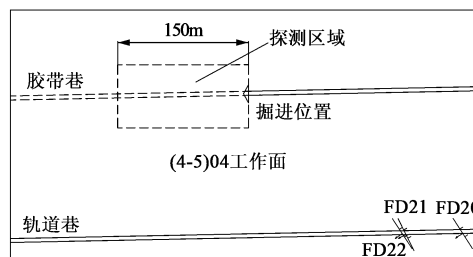


图 4 (4-5) 04 胶带巷反射波超前探测位置示意

### 2.2 方案设计

探测在迎头有限空间内展开, 采用炸药震源。受现场条件限制, 布置观测系统时, 激发源  $S_i$  设置在巷道上帮, 设计激发 24 炮, 设计炮间距 2m,  $S_1$  靠近迎头, 炮孔深 1.5m, 孔径 48mm。三分量检波  $R_1$  和  $R_2$  分别布置左后侧, 上帮最小炮检距 15m,  $R_2, R_1$  距离 5m, 检波孔深 2m, 孔径 65mm。选用矿用乳胶炸药, 每孔药量 100g, 采用矿用一段瞬发雷管引爆。一炮一放, 放炮顺序为  $S_1, S_2, \dots, S_{24}$ 。观测系统设计方案如图 5 所示。

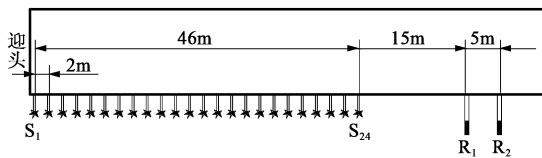


图 5 (4-5) 04 胶带巷超前探测系统设计方案

### 2.3 数据分析及处理

数据采集每道采样点数 2048，采样间隔 0.16ms，系统增益均为 24dB。每次激发有 6 道同时接收，设计 24 炮，其中 21 炮有效，共采集 126 道数据，数据波形饱满、同相轴较连续、起跳明显，满足后期数据处理要求。

通过 FFT 工具地震波形进行频率域分析。如图 6，可以看出不同分量频带分布略有差异，X 分量频带范围 150~310Hz，主频为 200Hz；Y 分量频带范围 200~300Hz，主频为 240Hz；Z 分量频率域分布较广，主频为 300Hz。

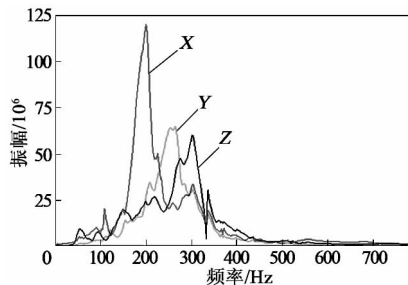


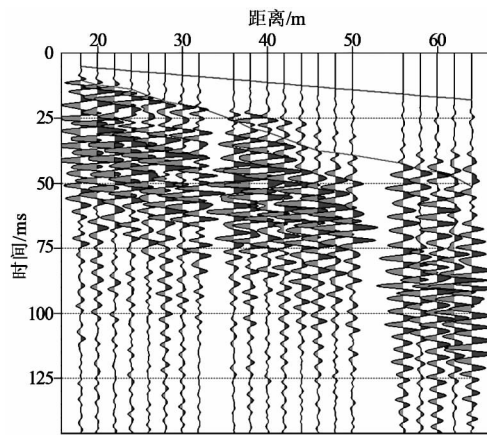
图 6 (4-5) 04 检波器 R<sub>2</sub> 不同分量的频谱分析

反射波超前探地地震数据后处理流程包括记录解编、预处理、核心处理和结果解释 4 个步骤。其中核心处理有反射波提取、速度分析和深度偏移 3 项内容。

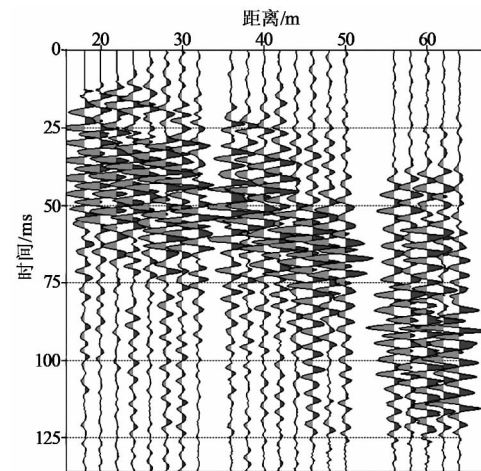
直达波时距曲线是一条经过坐标原点的直线，但是在采集过程中，由于雷管延时或者数据采集仪与起爆器的不同步会造成直达波时距曲线不是直线也不通过坐标原点。需要对偏离该直线的记录道进行时差校正（即静校正）。如图 7 (a) 所示，根据 2 号检波器 X 分量获得探测区域拟合纵、横波速度分别为 3.4m/ms 和 1.9m/ms，利用采样时间和直达波速度可初步确定探测区域的速度范围，同时利用其作为背景速度进行深度偏移。

基于在时距关系上巷道迎头前方反射界面与迎头后方及巷道侧向反射界面呈现不同的视速度规律，利用  $\tau-p$  变换滤波、 $F-K$  滤波方法提取出巷道前方界面反射波，与此同时，声波、面波等干扰波也得到了压制。图 7 (b) 为反射波提取图。深度偏移处理为后处理的核心内容，在给定速度模型

的条件下，将来自前方介质的反射能量偏移归位至真实空间点上。



(a) 直达波波速求取



(b) 反射波提取

图 7 检波器 R<sub>2</sub> 的 X 分量直达波波速求取及反射波提取

### 2.4 成果解释

根据地震勘探信号处理相关知识，煤岩体介质波阻抗差异决定地震波反射效率，波阻抗差异越大，反射回来的地震信号越强，表现在偏移后的波形亮点颜色越深，反射界面也就越明显。煤矿中的波阻抗界面主要有断层、破碎带和陷落柱等。断层完整平滑，地震波经过时超前半个相位后反射回来，但整体上波形特征未发生变化，偏移后仍能保持波峰波谷的特征。地震波传播遇到不完整且粗糙的煤岩破碎带或陷落柱时，反射波易相互干扰，反射回来的信号不能保证其完整的波形特征，偏移后表现为波形亮点颜色浅，出现单一波峰或单一波谷情况。

图 8 为巷道迎头前方 150m 范围内 X 分量偏移成像反射界面提取剖面图，图中横坐标表示沿巷走向迎头前方距检波器 R<sub>1</sub> 的距离。剖面反映了巷道前方波阻抗差异界面的空间位置关系，颜色深浅表征反射波能量幅值的大小，根据能量幅值的不

同,提取反射能量较大的界面,超前迎头150m范围内存在4组较强反射界面,将其各自命名为 $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ 和 $P_4$ 。

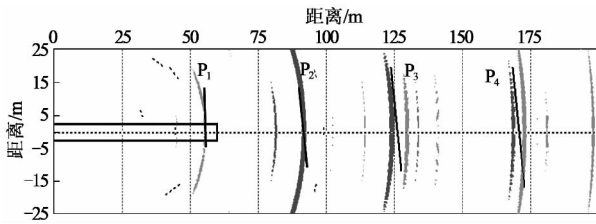


图8 X分量偏移成像反射界面提取

反射界面 $P_1$ 处在迎头稍往外位置附近,影响范围较小,推断为小范围的构造异常区,可以作为实验前发生的迎头顶板垮落形成破碎带的一个验证。

反射界面 $P_2$ 距离迎头约30m,叠加波形呈现单一波谷特征,可以推断此处为影响范围较小的破碎构造异常区。

反射界面 $P_3$ 距离迎头约70m,影响范围超前迎头65~75m,综合分析反射能量和影响范围,推断其为小断层或小规模破碎带。

反射界面 $P_4$ 距离迎头约112m,影响范围为超前迎头105~120m,该组反射能量弱于反射界面 $P_3$ ,可能由小断层或者小规模破碎带控制。

### 2.5 探测结果验证

(4-5)04胶带巷恢复生产后,对探测结果进行追踪可知,在距探测时迎头75m处遇见煤岩体破碎带A,距离迎头117m时出现小断层带B,这与探测结果中的 $P_3$ 破碎带和 $P_4$ 小断层破碎带位置和规模几本吻合,如图9所示。

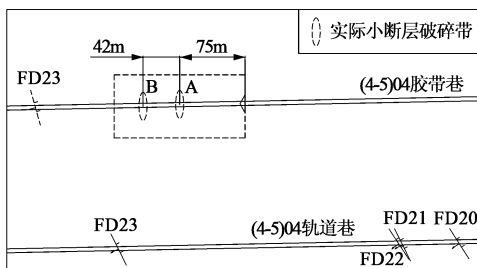


图9 掘进过后结果验证对比

## 3 结论

利用地震反射波超前探测技术测得的反射界面 $P_1$ ,  $P_3$ 和 $P_4$ 位置与事后追踪掘进过程中揭露的情况基本吻合,并在掘进时及时做出相应的应对措施后保证了生产正常进行,探测结果对巷道安全掘进能起到一定的指导作用。但是对前方隐伏异常体存

在范围或者断层的落差不能精确量给出,需要借助钻探等其他一些勘探手段进行综合判断。

### 【参考文献】

- [1] 张平松,刘盛东,吴建生. 坑道掘进空间反射波超前探测技术[J]. 煤炭学报,2010,35(8): 1331-1335.
- [2] 张平松,吴健生. 中国隧道及井巷地震波法超前探测技术研究分析[J]. 地球科学进展,2006,21(10): 1033-1038.
- [3] 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(S1): 2847-2851.
- [4] 王齐仁,杨天春. 隧道地质灾害超前预报的地震反射法[J]. 地球物理学进展,2006,21(2): 643-649.
- [5] 刘盛东,张平松. 地下工程震波探测技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社,2008.
- [6] 冯宏. 我国防止矿井瓦斯事故的地球物理探测技术进展[J]. 地球物理学进展,2005,20(4): 1171-1175.
- [7] 常旭,刘伊克,桂志先. 反射地震零偏移距逆时偏移方法用于隧道超前预报[J]. 地球物理学报,2006,49(5): 1482-1488.
- [8] 沈鸿雁,李庆春,冯宏. 隧道反射地震超前探测偏移成像[J]. 煤炭学报,2009,34(3): 298-304.
- [9] 杜立志,殷琨,牛建军. Kirchhoff深度偏移在隧道超前预报反射波提取中的应用[J]. 探矿工程-岩土钻掘工程,2008,3(2): 69-74.
- [10] 黄伟,邓世坤. 偏移方法用于探地雷达图像处理的有效性研究[J]. 地质科技情报,2001(4): 99-102.

[责任编辑: 施红霞]

(上接4页)

- [7] 王国法,姚连登,徐亚军,等. 低焊接裂纹敏感性钢WDB620焊接性及其在液压支架上的应用[J]. 煤矿机械,2003,24(10): 72-74.
- [8] 中华人民共和国国家标准. GB/T 17396-2009 液压支柱用热轧无缝钢管[S]. 北京: 中国标准出版社,2010.
- [9] 张晓峰,李玉岭. 矿用单体液压支柱油缸材料性能分析及成本测算[J]. 煤矿开采,2007,12(1): 93-97.
- [10] 张增志,牛俊杰. 煤中的羧基、酚羟基对低合金钢27SiMn的腐蚀作用[J]. 中国腐蚀与防护学报,2004,24(5): 311-313.
- [11] 张增志,牛俊杰,韩桂泉. 27SiMn在矿井褐煤环境中的电化学行为[J]. 腐蚀科学与防护技术,2003,15(3): 178-179.
- [12] 王首辉. 液压支架用立柱缸体锈蚀的原因分析及解决方法[J]. 矿山机械,2008,36(16): 65-66.
- [13] 赵四新,姚连登. 采用先进控轧控冷技术生产高强度宽厚板[A]. 2009年全国高品质热轧板带材控轧控冷与在线、离线热处理生产技术交流研讨会文集[C]. 江苏宜兴,2009.
- [14] 杜伯奇,杨庆东,董和泉,等. 激光强化不锈钢立柱的研发[J]. 矿山机械,2009,37(5): 32-34.
- [15] 尚慧岭,樊晋予,赵恒,等. 液压支架立柱缸体不锈钢镀套修复[J]. 煤矿机械,2010,31(11): 183-184.

[责任编辑: 邹正立]