

胡国泽,滕吉文,皮娇龙,等.井下槽波地震勘探——预防煤矿灾害的一种地球物理方法.地球物理学进展,2013,28(1):0439-0451,doi:10.6038/pg20130150.

HU Guo-ze, TENG Ji-wen, PI Jiao-long, *et al.* In-seam seismic exploration techniques——a geophysical method predicting coal-Mine disaster. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2013, 28(1):0439-0451,doi:10.6038/pg20130150.

## 井下槽波地震勘探 ——预防煤矿灾害的一种地球物理方法

胡国泽<sup>1,2</sup>, 滕吉文<sup>1,2\*</sup>, 皮娇龙<sup>2</sup>, 王伟<sup>3</sup>, 乔勇虎<sup>2</sup>

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;  
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘 要** 当在煤层中激发地震波时,由于顶、底板围岩速度明显高于煤层中地震波的传播速度,当地震波入射角大于临界角时会发生全反射,经过多次全反射混合叠加,在煤层中形成槽波.槽波是一种围限波,它最大的特点是频散现象,槽波在煤层中传播时还具有速度低、衰减弱等特点,因此可以用来探测煤层中的采空区、断层等地质构造.本文初步阐述了槽波地震勘探技术的研究现状,槽波的形成,槽波的特点、槽波地震勘探的工作方法以及应用实例等内容,并基于其特点对槽波地震勘探技术作出了展望.

**关键词** 槽波地震勘探,煤炭,反射法,透射法,断层

doi:10.6038/pg20130150

中图分类号 P631

文献标识码 A

## In-seam seismic exploration techniques ——a geophysical method predicting coal-Mine disaster

HU Guo-ze<sup>1,2</sup>, TENG Ji-wen<sup>1,2\*</sup>, PI Jiao-long<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>3</sup>, QIAO Yong-hu<sup>2</sup>

(1. College of Geoprospection Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;  
2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029;  
3. Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

**Abstract** Since the velocities in surrounding rocks of roof and floor are faster than those in coal seam, the total reflection takes place if the angle of incidence is greater than critical angle when the seismic waves are excited in coal seam. After multiple combination and superposition of total reflection, channel wave will generate in coal seam. Channel wave is a confined wave and has the dispersion phenomenon which is the most important feature. Besides, when propagating in coal seam, channel wave has other features including low speed and weak attenuation. So it can be used to detect voids, faults and other geological structures in coal seam. This paper describes the current research situation of In Seam Seismic, the formation of channel wave, channel waves' features, methods of In Seam Seismic exploration, example of application and so on, and make an expectation about In Seam Seismic exploration according to its characteristics.

**Keywords** in seam seismic exploration, coal, reflection method, transmission method, fault

收稿日期 2012-06-10; 修回日期 2012-09-10. 投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家自然科学基金委重点项目(41130419)资助.

作者简介 胡国泽,男,满族,1985年生,吉林大学博士研究生.主要从事煤矿灾害预测研究.(E-mail:hguoze@163.com)

\* 通讯作者 滕吉文,男,1934年生,教授,研究员,中国科学院院士.主要从事地球物理学和地球动力学研究.  
(E-mail:jwteng@mail.iggcas.ac.cn)

### 0 引言

煤炭是我国的重要能源. 在我国, 煤炭储量远远高于目前已查明的石油、天然气储量, 煤炭生产在我国国民经济中具有举足轻重的地位. 在我国的能源消耗结构比例中, 煤炭占一次性能源的 70% 以上, 并且电力能源的 67%、化工原料的 60% 和民用能源的 80% 均来自于煤炭. 2005 年煤炭在我国一次能源生产和消费结构中的比重分别占 76% 和 69%<sup>[1]</sup>. 我国煤炭产量占世界总产量的 30% 以上, “十五”期间, 我国煤炭产量由 2000 年的 13 亿吨增长到 2005 年的 22 亿吨, 2010 年达 32 亿吨, 煤炭生产在我国国民经济中具有举足轻重的地位(图 1). 新中国成立以来, 我国在煤矿灾害防治方面积累了丰富的经验, 理论研究及技术应用都取得了显著的进展. 然而, 我国煤矿的开采条件十分复杂, 受水、冲出地压、煤与瓦斯突出、地温等多种自然灾害困扰. 随着我国能源结构的调整, 需求量不断增大, 开采深度及强度亦不断加大, 小断裂、破碎带和富水区危险性逐渐增加, 再加上安全管理力度不够、工人的安全思想意识淡薄、设备陈旧及先进技术推广缓慢等诸多原因, 各种灾害日趋显现, 煤矿安全问题日益突出, 井下矿工伤亡等矿难事故频发, 严重制约了煤炭工业安全生产<sup>[2-6]</sup>. 近年来, 我国煤矿在生产过程中各种灾害事件频频发生, 给国家的财产和人民的生命安全造成了严重的损失. 尽管我国在煤矿事故起数、死亡人数及百万吨死亡率逐年下降, 但是发生伤亡事故的比例还是相当高的(图 2), 据统计, 我国每百万吨煤死亡率约为美国的 70 倍, 南非的 17 倍, 俄罗斯和印度的 10 倍.

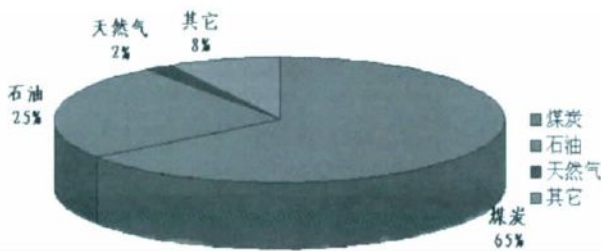


图 1 近几年我国能源消费构成图

Fig. 1 The energy mix map of China in recent years

在这种形势下, 必须寻找一种新的有效的技术方法以适应这种新形式, 在诸多的地球物理方法中, 槽波地震勘探是最受各国关注、最有发展前景的一种方法<sup>[7-9]</sup>. 槽波地震勘探技术主要用于井下探测煤

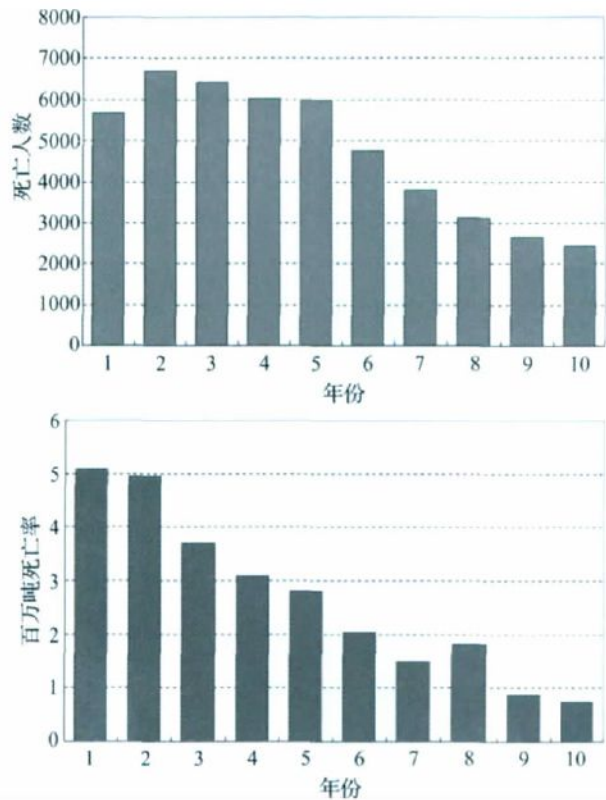


图 2 2001-2010 年我国煤矿事故统计直方图

Fig. 2 The coal mine accidents statistics histogram of China in 2001-2010

层的不连续性, 如煤层厚度变化、大、小断层、陷落柱、矸石层分布、剥蚀带等<sup>[10-12]</sup>, 这些尺寸较小的地质异常在地面上用地震勘探或其它勘探手段是很难探测出来的, 可就是这些不能预先被探测出来的小构造可能给正规的采煤工作造成很大的经济损失甚至于人员伤亡<sup>[13]</sup>. 因此, 现代化采煤技术迫切需要超前探明工作面前方的煤层状况. 槽波地震勘探技术以其探测距离大、精度高、抗干扰能力强、波形特征较易识别等特征而越来越受到采煤工作者们的重视<sup>[14]</sup>. 基于二维物理模拟研究结果表明, 以 SH 波干涉叠加形成的 Love 型槽波具有较好的效果, 要比 P-SV 波干涉形成的 Rayleigh 型槽波具有更强的反射和绕射能量<sup>[15,16]</sup>.

### 1 研究现状

槽波地震勘探是利用煤层中激发和传播的地震槽波探查工作面前方小断层或其它地质异常的一种地球物理方法, 是地震勘探的一个分支<sup>[17]</sup>.

1955 年, Evison 在新西兰首次于煤层中激发和记录到了槽波, 并在《Nature》杂志首次发表了有关

槽波的杰出文章,文中叙述了他的实验、数据的分析和解释<sup>[18]</sup>。他指出,这种波具有频散的特征,并与 Love 波频散关系进行了比较。Evison 的文章虽短,但意义重大,为新兴的槽波地震勘探拉开了序幕。

1963 年,德国人 Krey 发表文章进一步奠定了槽波地震勘探的基础<sup>[19]</sup>。他观测了煤层及其围岩的物性后指出,煤层应该是地震能量的一个良好的波导层,并预言可以在采煤工作面上用地震方法检测煤层中的小断层。文章首次详细地从理论上对槽波的频散关系进行了计算,并且讨论了他在井下试验的结果。

上世纪 70 年代以前,即便是最先开展槽波研究的国家,无论英国和德国均未给予足够的重视,槽波地震勘探发展缓慢。1973 年中东战争爆发,石油价格猛涨,煤炭受到格外重视,需求量急增,随之而来的综合机械化采煤对预测煤层小构造的要求更加迫切,世界各国先后成立了研究机构,槽波地震勘探技术蓬勃发展起来。到了 70 年代后期,槽波地震勘探已成功应用于各种地质条件。80 年代以来,德国、英国、澳大利亚、美国等都先后投入到实际应用。

我国是一个以煤炭为主要能源的国家,开展槽波地震勘探研究有特别重要的意义,但我国起步较晚,1978 年我国一些单位与矿务局合作,开始进行现场试验,同时也进行物理模型研究及矿井地震仪的研制;1983 年,中国矿业大学也从事槽波传播特征及数值模拟研究,同时在微机上开发了可独立运行的处理软件;1986 年煤炭科学总院西安分院引进了槽波地震仪及专用软件后,广泛开展了现场试验,

先后在几十个工作面上开展了方法的研究,在陷落柱、冲刷带、断层等小构造探测中取得了不少成功的例证<sup>[20]</sup>。90 年代,槽波地震勘探技术在我国经历了一个飞速发展时期,并在很多煤矿开采前期做了试验性的工作。90 年代末,煤炭行业不景气,槽波探测技术发展缓慢。又由于槽波数据处理上多借鉴反射地震勘探方法,处理具有频散特征的槽波信号数据较为困难,这也制约了该技术的发展。

## 2 槽波的形成

在煤系地层中,煤层与围岩相比具有速度低、密度小的特点。当在煤层中激发一个震动时,便会产生地震波,包括 S 波和 P 波,这两种地震波向四周扩散传播。由于煤层的波速明显低于顶、底板围岩的速度,当地震波传播到煤层的顶板和底板时部分能量将会被全反射回来,这些能量经过多次全反射被禁锢在煤层及其邻近的岩石中,不向围岩辐射,在煤层中相互干涉叠加,形成一个较强的干涉扰动,即槽波<sup>[21]</sup>。图 3 描述的是槽波的形成过程,煤层内震源产生的地震波向顶、底板传播,在 A 区由于地震波的入射角小于临界角,所以一部分能量透过顶、底板向围岩中泄露,而另一部分能量则被反射回煤层内部, A 区成为泄漏区; B 区和 C 区由于入射角大于临界角,地震波在顶、底板界面上被全反射和全折射回煤层之中,这些地震波在 C 区内相互叠加混响形成槽波。煤层是一个典型的低速夹层,在物理上构成一个波导,在煤层中激发地震波时,由于顶、底板界面的多次全反射,槽波的能量不向围岩扩散,因此槽波

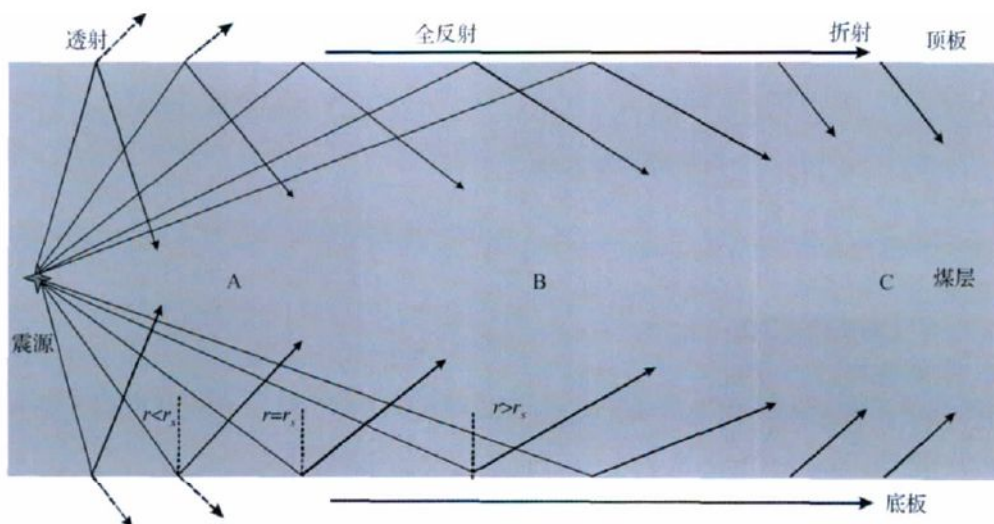


图 3 槽波形成示意图

Fig. 3 The schematic diagram of channel wave formation

在煤层中传播的距离较远<sup>[22]</sup>。

根据不同的振动形式,槽波可以分为两种类型:

1) Love 型槽波是由 SH 波干涉叠加形成的,其质点的振动方向平行于煤层面,垂直于波的传播方向;

2) Rayleigh 型槽波是由 P-Sv 波干涉叠加形成的,质点的振动方向垂直于煤层面,平行于波的传播方向,运动轨迹呈逆椭圆状。

在槽波地震勘探中,一般选用 Love 型槽波,这是因为:Love 型槽波由 SH 波干涉形成,形成条件只要求煤层 S 波速度小于围岩 S 波速度,这一条件容易满足;而 Rayleigh 型槽波则由 P-Sv 波干涉形成,只有当煤层的 P 波速度小于围岩的 S 波速度时才能形成,形成条件要求较苛刻;Love 型槽波只有一个振动分量,易于接收;Rayleigh 型槽波则有两个振动分量,不易接收;Love 型槽波对各种异常体的反映比较敏感,分辨率较高,且 Love 波物理构成简单,易于研究解释<sup>[15]</sup>。

煤层及围岩的速度条件直接关系到槽波的形成。当垂直极化的 Sv 波入射到煤-岩界面时,部分能量转化成 P 波,若 P 波不满足全反射条件(即煤层 P 波速度大于围岩 S 波速度),它将以透射的形式向围岩辐射,能量不断漏失,导致 P-Sv 波迅速消失,从而不能形成 Rayleigh 型槽波;而 SH 波在煤-岩界面上一般都能满足全反射条件(即煤层 S 波速度小于围岩 S 波速度),相互干涉叠加形成 Love 型槽波。因此,当煤层的 P 波速度小于围岩的 S 波速度时,煤层中 Love 型槽波和 Rayleigh 型槽波同时存在;而当煤层的 P 波速度大于围岩的 S 波速度时,煤层中只存在 Love 型槽波<sup>[23,24]</sup>。

### 3 槽波的特点

槽波最大的特点就是频散,即槽波的传播速度是频率的函数。由于槽波中包含许多不同频率的地震波,而它们的传播速度各不相同,因此随着传播距离的增加波列“散开”,逐渐形成一个变频的长波列。频散使槽波在传播过程中相位与能量的极大值的传播速度不同,即相速度与群速度出现明显的差异<sup>[25-29]</sup>。槽波的频散现象受很多因素影响,如煤层厚度、煤层与围岩的密度、煤层与围岩的速度差异及围岩的不对称性等。频散给槽波地震勘探带来三个问题:

1)不能精确估计波至时间,有关地面地震勘探数据分析中的同相轴对比、初至时间拾取均不适用,

因此一些处理方法如水平叠加技术、速度分析、偏移等都要做相应的变化;

2)不同类型、不同振型的槽波波列互相重叠、难于分开;

3)波列散开,使振幅减弱,降低了信噪比<sup>[30,31]</sup>。

图 4 是在单层煤情况下勒夫波频散与煤层厚度的关系,可见在同一频率下煤层越厚,勒夫波速度越低<sup>[32]</sup>。该图表明在什么煤层厚度情况下选择何种频率的勒夫波速度成像,对煤层变化最敏感。在未知煤层厚度的情况下,我们通常选取 125 Hz 的勒夫波,这样可先大致探测一下煤层厚度,若煤层较厚,再降低频率,如选取 100 Hz 对较厚煤层的分辨率较高;若煤层较薄,则增大频率,如选取 250 Hz 对薄煤层分辨率较高。

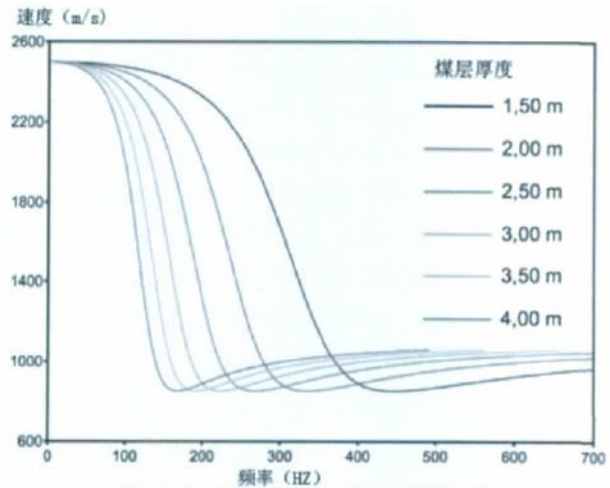


图 4 勒夫波频散与煤层厚度的变化关系

Fig. 4 The relationship between Love waves dispersion and the changing of coal seam thickness

在煤层中传播的槽波还具有高频率、低速度、低衰减等特点<sup>[33]</sup>。槽波在沿煤层传播过程中,其能量不断衰减,这主要与波前扩散现象、频散现象和介质的非完全弹性吸收等有关。槽波局限在煤层及邻近围岩的一个薄层内,近似二维空间向外传播,其波前呈圆柱状,随着传播距离的增加,柱状波前不断扩大,能量密度不断减小,其振幅与传播距离的平方根成反比。又由于频散现象,槽波的波列随传播距离的增大而不断散开,槽波振幅不断减小。综合这两种衰减因素,槽波的振幅与传播距离成反比,总的效应与球面体波近似。

由于槽波地震勘探有其自身的特点,从槽波的理论到数据采集方法、数据处理成像技术、地质解释

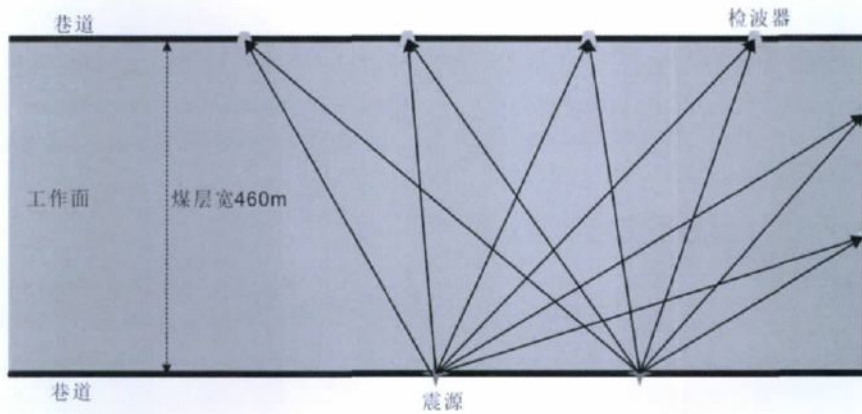


图 5 透射法勘探原理图

Fig. 5 The principle of transmission prospecting

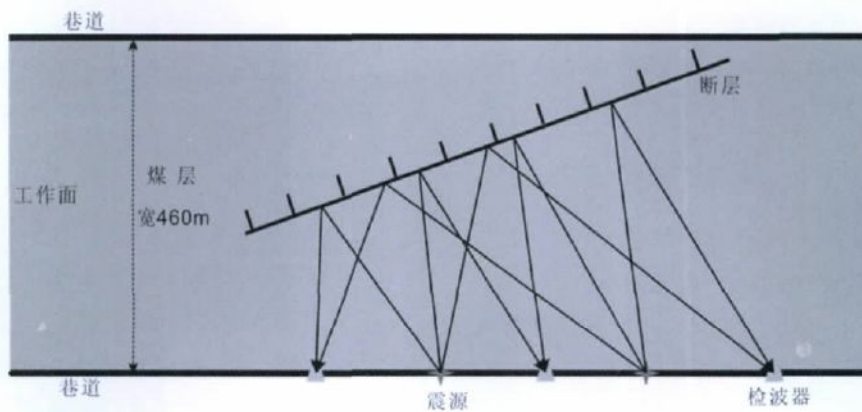


图 6 反射法勘探原理图

Fig. 6 The principle of reflection prospecting

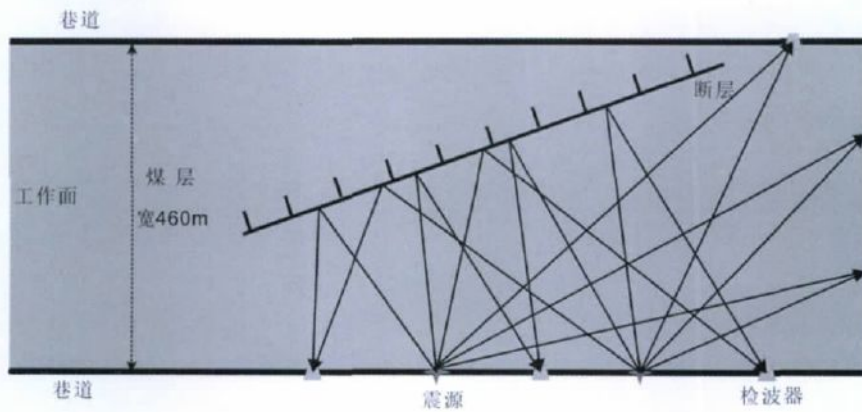


图 7 透射、反射联合勘探原理图

Fig. 7 The combination technique principle of transmission and reflection

等皆有不同于地面地震勘探之处,其显著特点是:

- 1) 槽波地震探测的范围较小,探测目标与测线不一定平行,其夹角可以是任意的,随机性大;
- 2) 数据采集环境复杂、恶劣,有众多的干扰信

号,能布置探测的空间与通道有限,施工安全性要求高,实验要求灵活;

- 3) 要求能解决频散和采集数据有限等问题的槽波数据处理方法<sup>[15]</sup>.

也正是由于它们之间存在这些差异,使得它可以较好地探测煤层的不连续性,如采空区、煤层厚度变化、煤层边界以及小断层和破碎带等,若煤层是近似均匀且各向同性的,则能够取得更好的效果<sup>[34]</sup>.

#### 4 槽波地震勘探方法

槽波地震勘探方法分为透射波法、反射波法和透射波-反射波联合勘探法<sup>[35]</sup>.

##### 4.1 透射波法

透射波法勘探时,震源布置在采煤工作面的一个巷道内,检波器布置在该工作面的另一个巷道内,以接收来自炮点的地震透射信息(图5).根据透射槽波的有无、强弱及有关的运动学、动力学参数,来判断震源与检波器排列之间扇形区域内煤层的不连续性和其它构造异常.当异常体尺寸大于煤层厚度时,地震槽波被完全阻挡,检波器接收不到透射槽波;当其尺寸相当于煤层厚度的一半左右时,地震槽波被部分阻断,接收到的透射槽波能量较正常情况有不同程度的减弱.透射波法一般用于探测煤层的地质结构和内部变异,包括煤层厚度变化、夹矸石分布、大小断层、陷落柱、剥蚀带、老窖等,在某些情况下可判断煤层内部压力相对变化.透射波法的探测距离约为煤层厚度的300倍<sup>[36]</sup>,若假设煤层的平均厚度为4 m,其探测距离可达1200 m,即可较好的满足目前煤矿采掘和安全生产的基本需要.

透射波法以方法灵活简单、数据处理和解释比较容易、探测范围大、准确率高而得到广泛应用,是槽波地震勘探最基本的探测方法,它还可以为反射波法数据处理和资料解释提供速度等参数.

影响透射波法探测的因素很多,如震源激发的能量强弱、煤层与其顶、底板围岩的物性差异、煤层厚度、煤层内构造和非构造地质破坏情况、裂隙发育程度、煤层夹矸等.透射波法探测可以判断煤层中地质构造异常的有无,但还没能解决异常的性质和类型的识别,也不能确定异常体准确的几何尺寸.

##### 4.2 反射波法

在槽波反射法勘探时,震源与检波器排列布置在同一条巷道内或工作面上,接收来自工作面内的地震反射信号(图6),根据检波器是否接收到非巷道反射槽波、能量强弱、运动学及动力学关系来确认前方是否存在煤层的不连续性<sup>[37]</sup>.当断层(或煤层不连续性)落差接近或超过煤层厚度时,则煤层被全部阻断,使得断面前后的物性参数(密度和速度)不同,在槽波沿煤层向远处传播过程中,遇到煤层不连

续体时就会发生反射;若落差较小,仅有部分能量产生反射,便会形成较弱的反射槽波.反射波法主要用于探测煤层内的各种大、小断层、破碎带及侵入体和岩墙等.

槽波反射信息一般能量较弱,记录的信噪比较低,在单次共炮点槽波反射记录上很难看到道间相关性较好的槽波反射同相轴<sup>[38]</sup>,这是因为反射槽波与很多因素有关,如断层的落差、多条断层、反射体的产状、横向岩石物性差异、断层破碎带的规模、煤层厚度及槽波频率高低等均影响反射槽波的能量.因此在处理反射槽波信息时,如何压制噪音与干扰,最大可能地突出有效信号并提取多种可利用信息、提高信噪比将成为影响槽波地震反射波法效果的关键技术<sup>[39]</sup>.

槽波反射法具有较好的精度<sup>[40-42]</sup>,它能确定煤层不连续体的位置及走向,但它与透射法一样,也不能准确确定断层落差大小和异常体的准确几何尺寸,这主要是由于对槽波的性质了解还不够全面,信息利用不足.

##### 4.3 透射-反射联合勘探法

若炮点位于通风巷道内,则检波器可以同时布置在通风巷道和运输巷道内.通风巷道内的检波器接收反射波信号,运输巷道内的检波器接收透射波信号.其原理与透射法及反射法相似(图7).

#### 5 应用实例

2007年在美国宾夕法尼亚州的Harmony煤矿进行了一次槽波地震勘探试验<sup>[43]</sup>,目的在于探测采空区边界.该煤矿是一个无烟煤煤矿,煤层厚度为0.3~4 m,平均厚度1.37 m,煤层宽约46 m,埋深69~122 m,顶、底板均为砂岩.顶板9~20 m厚,底板约3 m厚.

这次试验共有5个震源排列和1个检波器排列,检波器排列位于右下角,共有16个检波器孔,所有的检波器孔均在煤层中间,其深度为1.5 m,这样避免了煤面破碎带的影响(图8).震源排列中有三个是为透射波法测量而设计的,两个是为反射波法测量设计的.本次试验共包括两个步骤:

1)进行透射波法测量,以确定该处煤层Love波的频散特性;2)进行反射波法测量,以确定煤层中采空区边界.

##### 5.1 透射波法测量

此次试验共进行了28次透射波法测量,在所有的测量中均能看到Love波,并且大部分比较清晰.

图 8 为透射波波形,其中 a 为原始数据产生的波形; b 为经过 200~600 Hz 带通滤波后的波形.在原始数据中就已经能够看到 Love 波,经过滤波后 Love 波变得更加清晰.在图 b 中标出了两个波带,第一个波带为透射 s 波,其宽度基本保持不变;第二个波带为透射 Love 波,这个波带所反映出的频散效果很明显——随着距离的增加波带越来越宽.

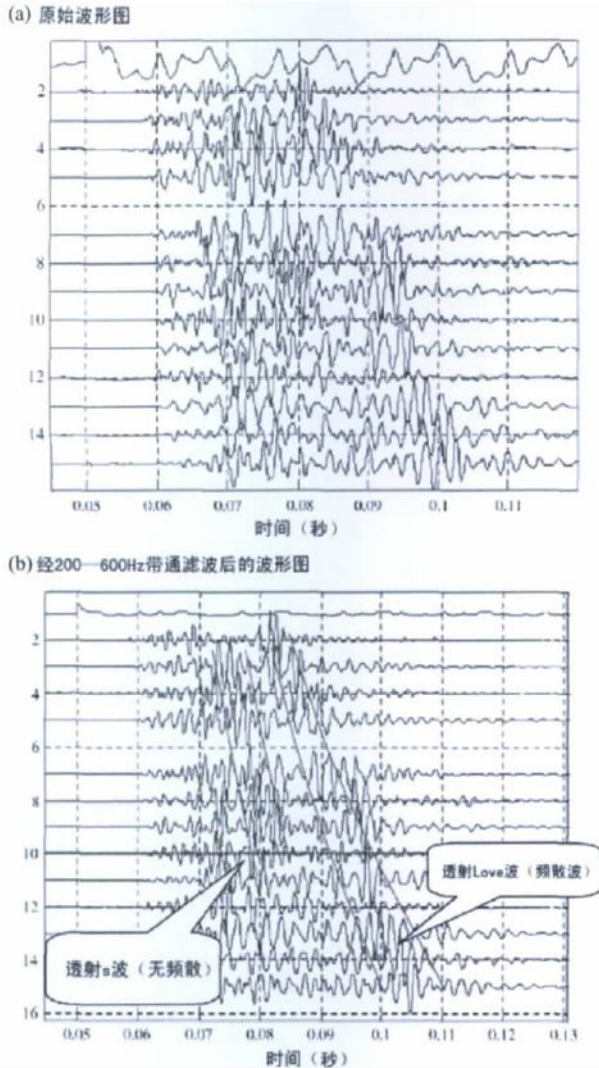


图 8 透射 Love 波波形<sup>[43]</sup>

Fig. 8 Love waves from the transmitted signals<sup>[43]</sup>

由于透射 Love 波的传播距离是已知的,其传播时间可由波形图中读取,这样就可以确定不同频率的 Love 波在煤层中的传播速度,即获得该处煤层的 Love 波频散曲线(图 9).

### 5.2 射波法测量

在获得了 Harmony 煤矿的 Love 波频散曲线之后,进行了反射法测量.此次试验共进行了 16 次

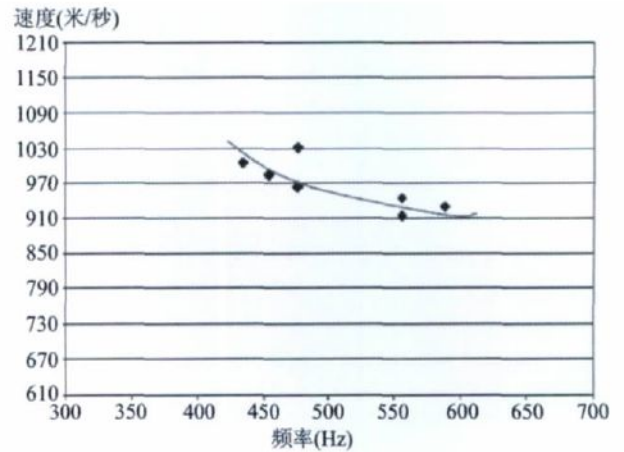


图 9 Harmony 煤矿的 Love 波频散曲线<sup>[43]</sup>

Fig. 9 The dispersion curve for the Love waves from the Harmony mine<sup>[43]</sup>

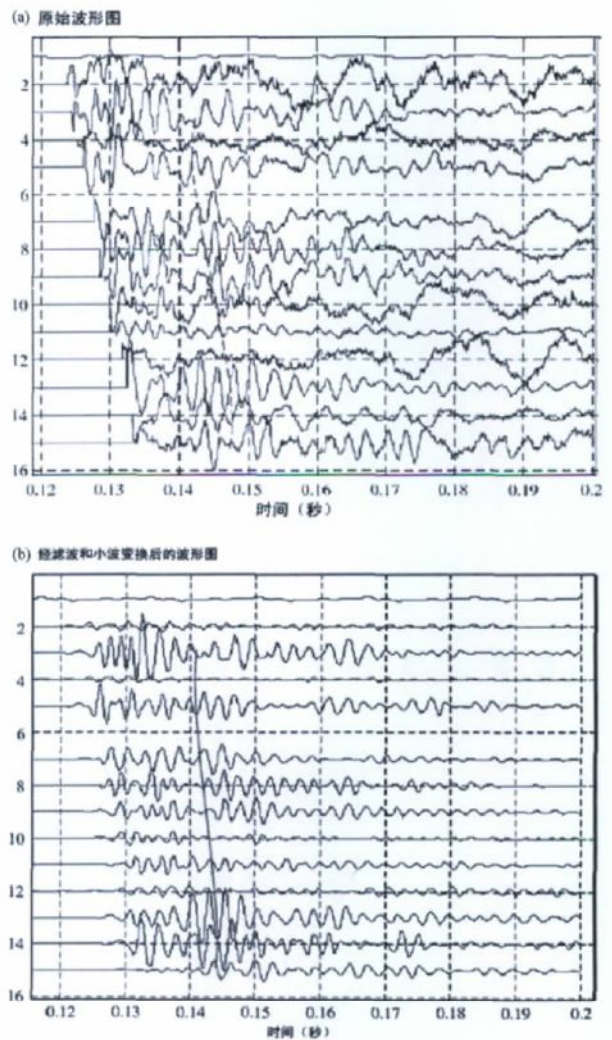


图 10 反射 Love 波波形<sup>[43]</sup>

Fig. 10 Love waves from the reflected signals<sup>[43]</sup>

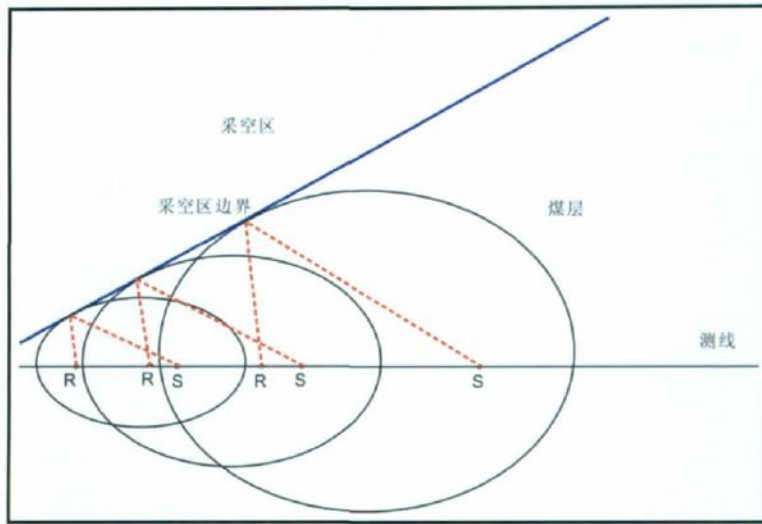


图 11 椭圆归位法划定采空区边界

Fig. 11 Delineating the void boundary by the elliptical method

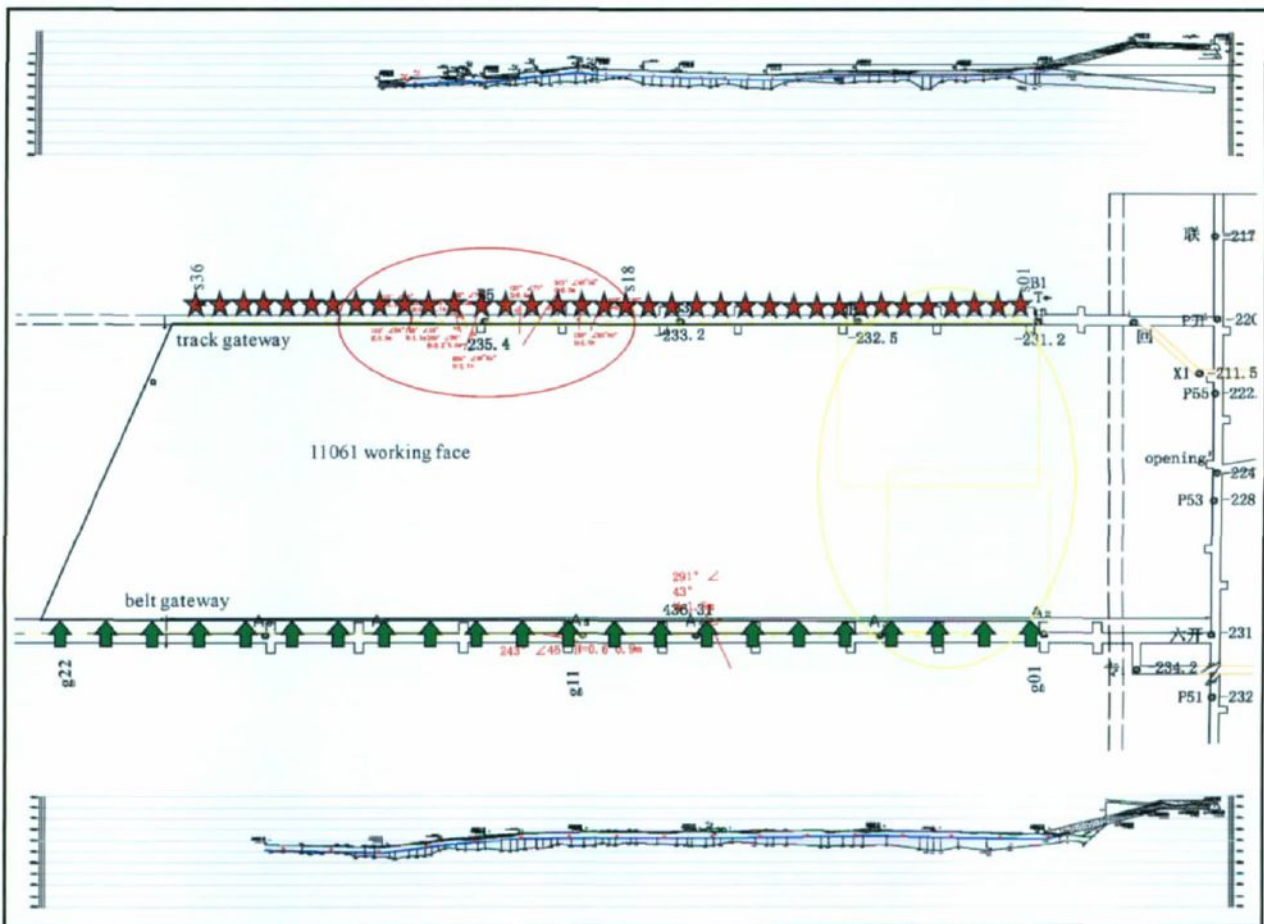


图 12 槽波透射法测量观测系统<sup>[39]</sup>

Fig. 12 The experimental layout of transmitted method<sup>[39]</sup>

反射波法测量. 由于反射 Love 波要比透射 Love 波弱得多, 必须采取一定的方法以增强反射 Love 波.

本次试验采用的是 200~600 Hz 带通滤波和小波变换, 经过处理的反射 Love 波清晰了许多, 且增强了



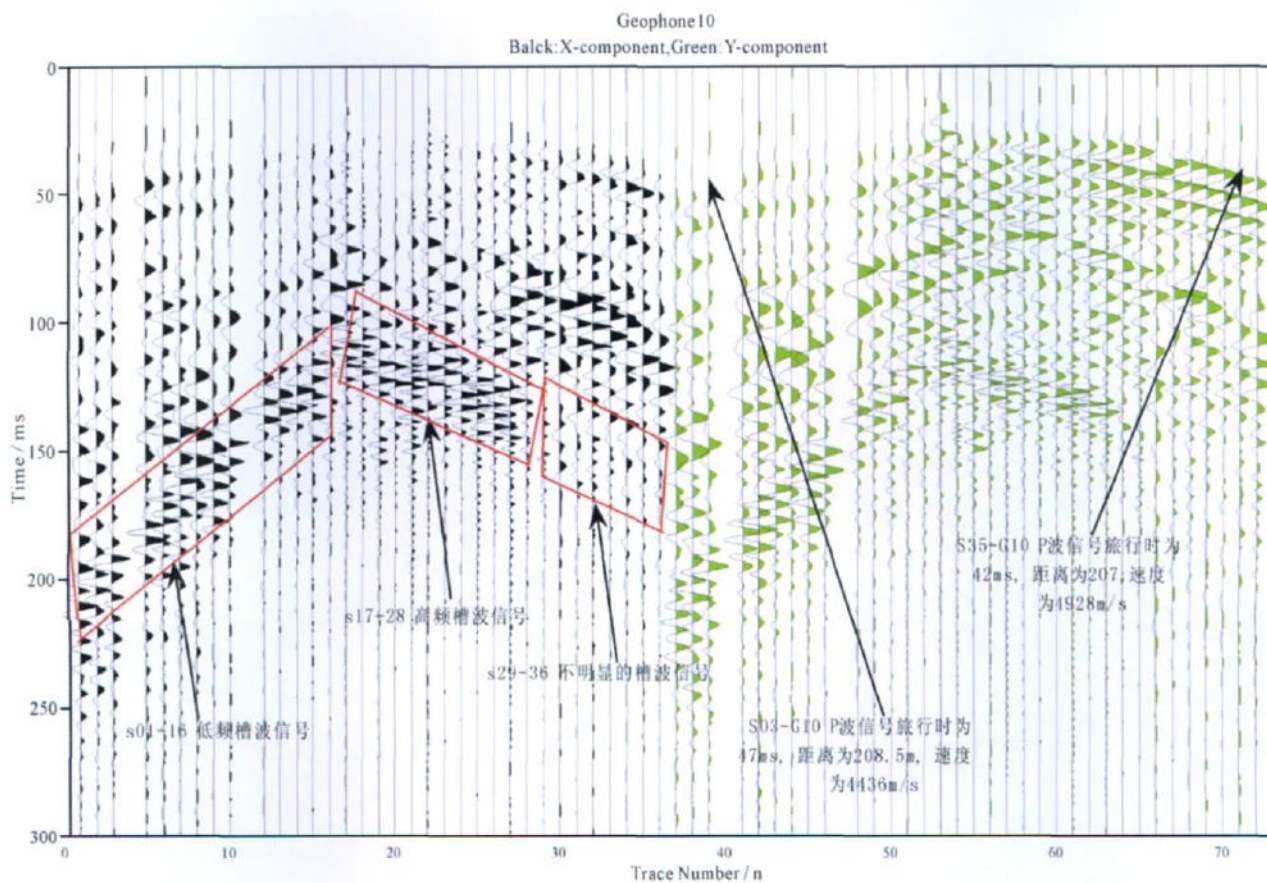


图 13 10 检波器记录的煤层波信息<sup>[39]</sup>

Fig. 13 The coal seam signal from Geophone 10<sup>[39]</sup>

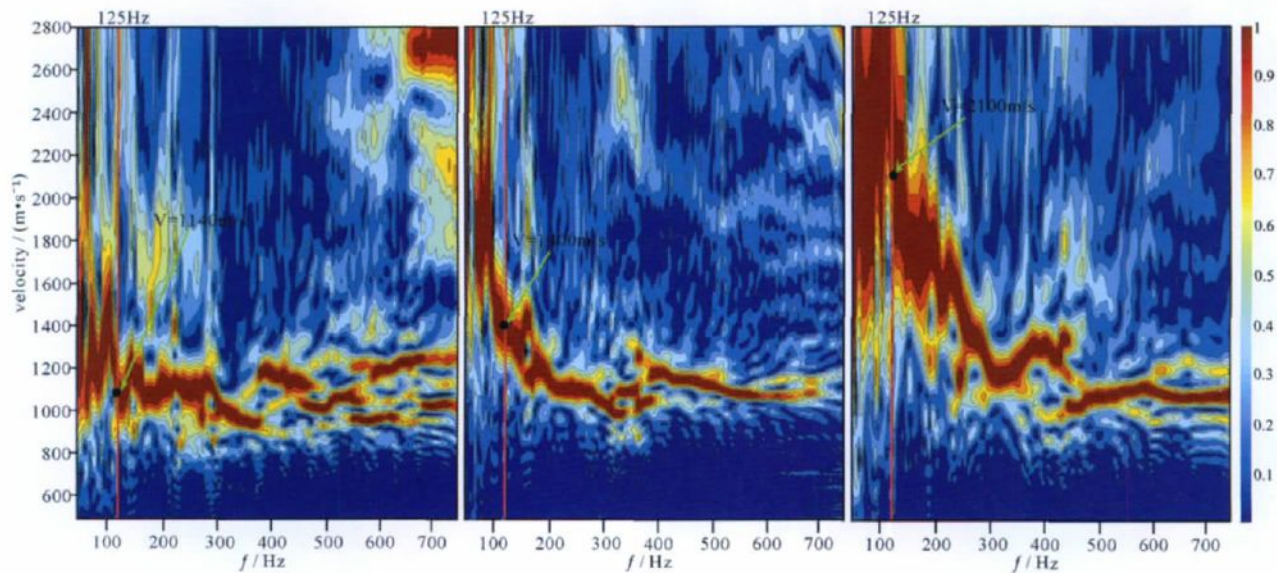
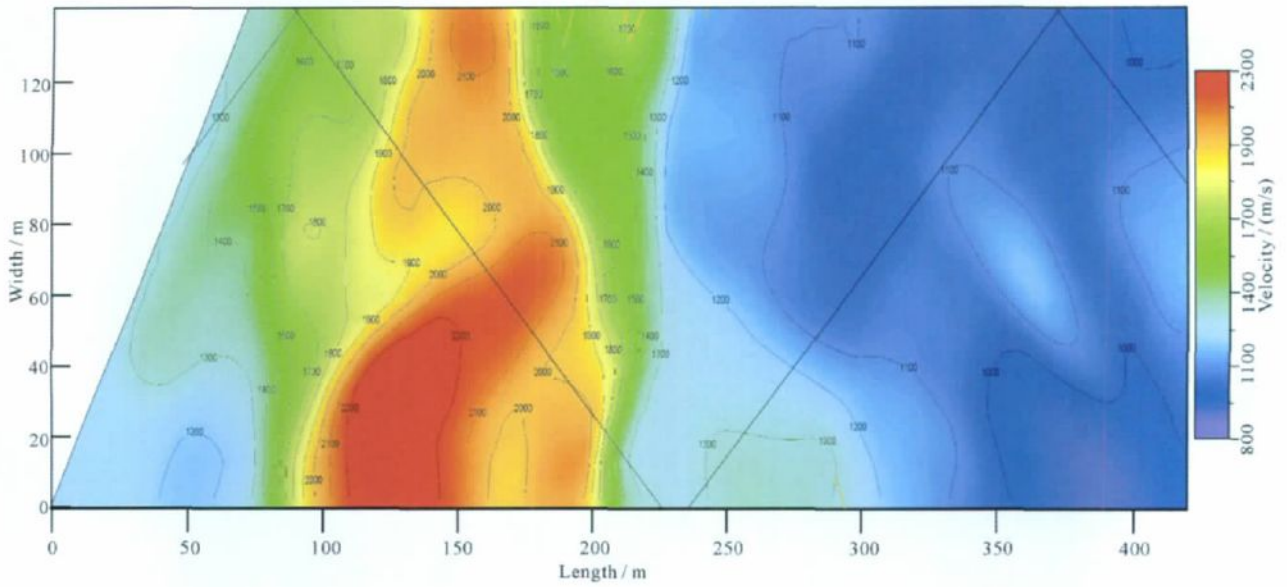
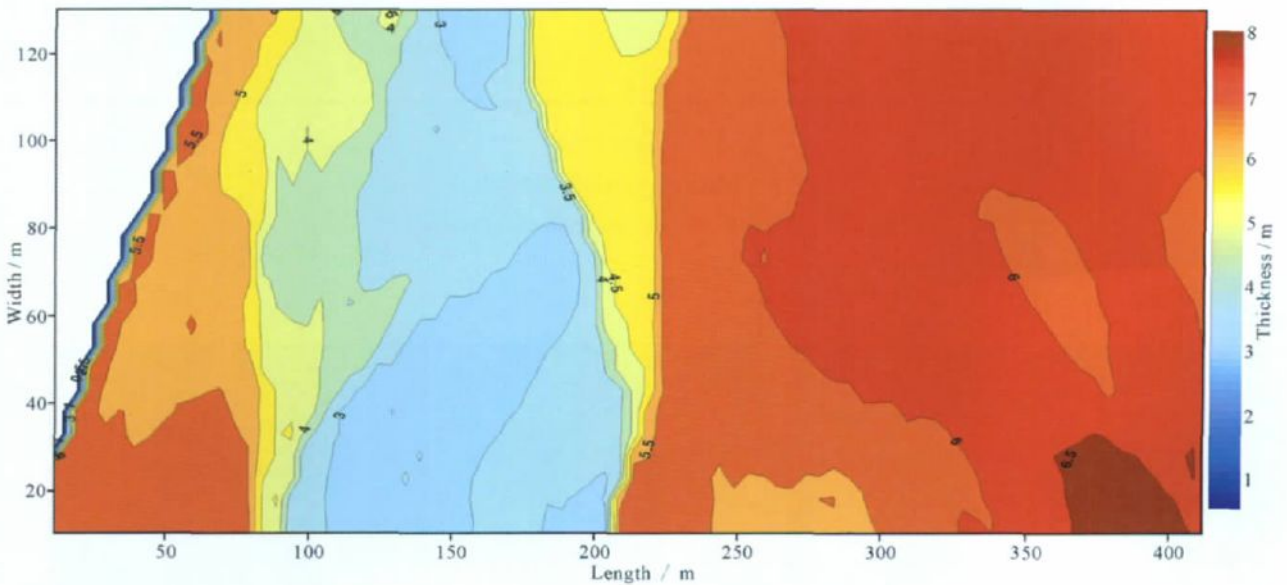


图 14 频散曲线图及 125 Hz 所对应的速度(a; S20-G05, b; S29-G06, c; S26-G14)<sup>[39]</sup>

Fig. 14 The dispersion curve and The velocity of 125Hz(a; S20-G05, b; S29-G06, c; S26-G14)<sup>[39]</sup>

图 15 工作面内层析成像结果:速度分布<sup>[39]</sup>Fig. 15 The tomographic result: The distribution of velocity<sup>[39]</sup>图 16 煤层厚度分布图<sup>[39]</sup>Fig. 16 The thickness distribution of the coal seam<sup>[39]</sup>

信噪比(图 10)。

在识别了反射 Love 波之后,接下来要确定采空区的边界.这次试验采用的是椭圆归位法,其基本原理是以震源和检波器的坐标为两个焦点,若已知地震波的旅行距离,则可以唯一确定一个椭圆,且反射就发生在该椭圆上(图 11).反射 Love 波的旅行时间可以由波形图中读取,其速度则可由 Love 波频散曲线中获得,两者相乘便可求得反射 Love 波

旅行距离.采用椭圆归位法的好处是并不要求震源与检波器在同一条直线上,检波器的空间分布也可以是不均匀的;且椭圆归位法利用原始反射 Love 波,不需要进行任何的数学处理,操作起来简单直观,易于理解.

对所有的反射 Love 波均采用椭圆归位法后,可以确定很多的椭圆,这些椭圆包络轨迹的切线以上位置即为逼近地确定采空区的位置.本次试验确

定的采空区的误差为 $\pm 4.6$  m,效果较好。

### 5.3 国内实例<sup>[39]</sup>

2010年我们在河南义马煤矿11061工作面进行了槽波透射法勘探,以预测煤层厚度变化<sup>[39]</sup>。工作面宽度135 m,勘探面长度420 m,煤层厚度变化1.5~8 m。观测系统布置如下(图12):炮线安置于轨道巷(红色星号位置),检波器安置于皮带巷(绿色箭头指示位置)。图中上下部分为皮带巷与轨道巷揭露的煤层厚度变化分布。

激发震源为炸药类型,药量200克,炮距10 m,共36炮,采用2分量检波器接收,检波点距为20米,共22个检波点。

#### 5.3.1 数据分析

原始数据分析:将共炮集数据抽成共接收点集数据,并经过滤波处理,只有06,07,08,09检波器可以采集到完整的煤层波信息,由此可以推测此处的地质异常体比较小。从10检波器Y分量数据分析得到P波速度,从X分量观测到槽波频率变化情况。

频散曲线分析:根据模型分析对比,可得到本工作面的一些参数,工作面巷道揭露的煤层厚度变化剧烈,从1.5 m到8 m之间;1000 m/s的速度值区域表示该区域煤层厚度大于或等于5 m左右;速度大于2200 m/s的区域表示该区域煤层厚度小于或等于2.0 m。根据对理论频散曲线的分析,确定以125 Hz槽波的理论到时进行层析成像反演计算。

图14为从实际数据中提取的频散曲线,来自不同的炮点检波点(S20-G05, S29-G06, S26-G14)。从图中可确定埃里相速度及125 Hz槽波速度与旅行时。

#### 5.3.2 成像结果

我们选择125 Hz频率用于观测煤层厚度约为2~5 m的煤层的厚度变化(图15)。从图15所示的速度分布分析,红色部分(高速度区)表示此处有一个与工作面掘进方向近乎垂直、近乎于西北至东南走向、宽约为150 m的较大地质异常。分析结果表明:该异常体延伸范围不会太大,即工作面内的断层落差与煤层厚度比应小于0.5。

煤层厚度的变化对槽波频散特征影响十分明显,波速随厚度增加而减小。按照巷道内显示的煤层厚度与层析成像结果,采用4阶多项式拟合速度-厚度关系,可将速度分布转换成煤层厚度分布(图16)。从图16中可以看到煤层厚度分布情况:中间薄,两端厚,右侧煤层厚度达6 m,到工区中部,煤层

变薄,在左侧,煤层厚度又增加到5 m左右。这与已知的地质资料信息吻合程度较高。

## 6 展 望

6.1 当煤层中的地质异常体倾角较大时,利用槽波地震勘探方法能够很好的成像;但当其倾角较小(小于45度)时,槽波地震勘探方法可能收集不到较全面的信息,从而会降低分辨率,即不能很好的成像。在这种情况下,拟采用3D槽波地震勘探,即在整个工作面上均安装检波器接受来自全空间的反射波及透射波,在能够收集更加准确和全面的信息的情况下,以提高探测的精度<sup>[44]</sup>。

6.2 随着煤矿开采深度的不断加大,地层应力对矿井安全的影响也越来越突出,在地层应力较大的区域常会导致煤爆、煤与瓦斯突出、顶板坍塌等煤矿灾害<sup>[45]</sup>。一般而言,地层应力随着深度的增加而增加,且在浅处横向应力随深度增加较快,当达到一定深度时,其随深度的变化逐渐减小直至消失;而垂向应力随深度的变化基本保持不变<sup>[46]</sup>。地层应力主要由重力和区域构造力组成,重力方面主要取决于覆盖其上面的岩层,相对而言较为简单;而区域构造力主要是由地层的横向构造运动引起的<sup>[47]</sup>,较为复杂,其分布特征没有一定的规律可循,而且常会随时间发生变化。到目前为止尚没有一种方法能够精确地探测地层应力的分布状况。由于地层应力较大区域的煤炭长期受到挤压作用,致使其密度逐渐变大,地震波在其中传播的速度也会随之变大,因此利用槽波地震勘探方法探测煤层的地震波传播速度的分布情况,从而可以对煤层应力的探测起到指导作用。

6.3 开展井下精细结构探测方法已迫在眉睫,煤层槽波地震勘探新技术应为首选。利用槽波地震勘探技术可探明工作面内断距大于煤厚1/3的断层分布和破碎带展布,并可探明采煤工作面内煤层厚度变化剧烈及在煤层巨厚情况下圈定断裂构造以及采空区的位置和产状,并争取探明其含水性<sup>[48,49]</sup>,力求了解煤层中的应力分布情况,从而准确地给出采煤工作面上不同地段的安全评估,安全地指导煤矿生产。我国煤矿开采中高分辨率勘探程度尚很低,随着国家对煤矿安全执行程度的加大,槽波地震勘探技术将有广泛的应用前景,并能安全地指导煤矿生产,从而带动我国煤炭行业的发展。

## 参 考 文 献 (References):

[1] 卢鉴章,刘见中.煤矿灾害防治技术现状与发展[J].煤炭科

- 学技术, 2006, 34(5): 1-5.
- Lu J Z, Liu J Z. Present status and development of mine disaster prevention and control technology[J]. *Coal Science and Technology* (in Chinese), 2006, 34(5): 1-5.
- [2] 薛华. 煤矿灾害的分析[J]. *煤炭技术*, 2009, 28(2): 95-96.
- Xue H. Analysis on disaster of coal mine[J]. *Coal Technology* (in Chinese), 2009, 28(2): 95-96.
- [3] 芦俊, 王赞, 石瑛. 利用多波地震与测井数据联合反演预测煤岩的坚固性. *地球物理学报*, 2011, 54(11): 2967-2972.
- Lu J, Wang Y, Shi Yi. Coal hardness prediction using joint inversion of multi-wave seismic data and logging. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(11): 2967-2972.
- [4] 董守华. 气煤弹性各向异性系数实验测试. *地球物理学报*, 2008, 51(3): 947-952.
- Dong S H. Test on elastic anisotropic coefficients of gas coal. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(3): 947-952.
- [5] 彭苏萍, 高云峰, 杨瑞召等. AVO 探测煤层瓦斯富集的理论探讨和初步实践——以淮南煤田为例. *地球物理学报*, 2005, 48(6): 1475-1486.
- Peng S P, Gao Y F, Yang R Z, *et al.* Theory and application of AVO for detection of coalbed methane —— A case from the Huainan coalfield. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(6): 1475-1486.
- [6] 左治兴, 朱必勇, 易斌等. 煤矿灾害及安全管理综合评价. *工业安全与环保*, 2006, 32(8): 52-54.
- Zhu Z X, Zhu B Y, Yi B, *et al.* Coal Mine Disasters and Comperhensive Assessment on Safety Management. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2006, 32(8): 52-54.
- [7] 孙文涛, 方正. 我国煤田物探技术的回顾与展望. *地球物理学报*, 1997, 40(S1): 362-368.
- Sun W T, Fang Z. Review and prospect of coal geophysical technology in China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, 40(S1): 362-368.
- [8] 方正. 中国煤田勘探地球物理技术. *地球物理学报*, 1994, 37(S1): 396-407.
- Fang Z. Technology of geophysical exploration of coal in China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1994, 37(S1): 396-407.
- [9] 唐文榜. 地震反射法中薄煤层分辨能力的研究. *地球物理学报*, 1987, 30(06): 641-652.
- Tang W B. On resolution of a thin seam in reflection seismic exploration. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1987, 30(06): 641-652.
- [10] Tang H G. Seismic Prospecting Technique for Coalbed Methane Accumulating Area. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2011(3): 224-230.
- [11] Qin K, Cui R F. Locating the Distribution of Gas Enriched Area Using Seismic P-Wave Azimuth Attributes. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2011(3): 189-194.
- [12] Luo D H, Sun S X, Zhang D H, *et al.* Application of Improved EAHP on Stability Evaluation of Coal Seam Roof. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2011(3): 384-393.
- [13] 吴有信. 综合物探技术在煤矿灾害防治中的应用. *安全与环境工程*, 2009, 16(2): 97-100.
- Wu Y X. plication of Integrative Geophysical Exploration to the Coal Mine Disaster Prevention, Safety and Environmental Engineering, 2009, 16(2): 97-100.
- [14] 王文德. 煤层的槽波赋存状况及其分类. *煤炭学报*, 1997, 22(4): 366-369.
- Wang W D. Occurrence of the channel waves in coal seams and its classification. *Journal of China Coal Society*, 1997, 22(4): 366-369.
- [15] 刘天放, 潘冬明, 李德春等. 槽波地震勘探[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1994.
- Liu D F, Pan D M, Li D C. In Seam Seismic Expioration [M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1994.
- [16] S. A. Greenhalgh, B. Zhou, D. R. Pant, *et al.* Numerical study of seismic scattering and waveguide excitation in faulted coal seams. *Geophysical Prospecting*, 2007(55): 185-198.
- [17] 杨文强. 槽波地震勘探的数学模型研究. *地质与勘探*, 2001, 37(3): 58-60.
- Yang W Q. Modeling Research of Channel Wave Seismic Exploration. *Geology and Prospecting*, 2001, 37(3): 58-60.
- [18] Evison, F. F. A coal seam as guide for seismic energy. *Nature*, 1955(176): 1224-1225.
- [19] Krey, T. C. Channel waves as a tool of applied geophysics in coal mining. *Geophysics*, 1963(28): 701-714.
- [20] 张守恩, 姜克富. 地震槽波法的方法试验. *地球物理学报*, 1983, 26(2): 198-203.
- Zhang S E, Jang F K. . The In Seam Seismic Exploration and Tests. *Chinese Journal of Geophysics*, 1983, 26(2): 198-203.
- [21] 程建远, 李浙龙, 张广忠等. 煤矿井下地震勘探技术应用现状与发展展望. *勘探地球物理进展*, 2009, 32(2): 96-111.
- Cheng J Y, Li X L, Zhang G Z, *et al.* Current status and outlook of seismic exploration applied underground in coal mine. *Progress in Exploration Geophysics*, 2009, 32(2): 96-111.
- [22] 林红涛. 槽波地震在东北地区的应用. *东北煤炭技术*, 1998(3): 11-14.
- Lin H T. Application of in-seam seismic method in some coal mining areas of northeast region. *Coal Technology of Northeast China*, 1998(3): 11-14.
- [23] 程久龙. Love 型槽波理论地震图的计算. *山东矿业学院学报*, 1994, 4(13): 349-353.
- Cheng J L. Calculation of the Theoretical Seismograms of Love Channel Waves. *Journal of Shandong Mining Institute*, 1994, 4(13): 349-353.
- [24] 徐果明, 倪四道, 王汉标. 瑞利型槽波的本征方程及其应用. *煤炭学报*, 1998, 2(23): 124-129.
- Xu G M, Ni S D, Wang H B. Eigenequation of Rayleigh Guide Waves and its Application. *Journal of China Coal Society*, 1998, 2(23): 124-129.
- [25] 宋玉平, 刘天放, 陈德行等. 大同侏罗纪煤层槽波频散特性及振幅特征. *煤田地质与勘探*, 24(6): 49-53.
- Song Y P, Liu T F, Chen D H. Frequency Dispersion and Amplitude Distribution of Channel Wave for Jurassic Coal Seams in DaTong Coalfield. *Coal Geology & Exploration*, 24

- (6)49-53.
- [26] 姬广忠,程建远,朱培民. 煤层 Love 型槽波数值模拟及其频散特征分析. 煤炭科学技术, 2011, 6(39): 106-109.  
Ji G Z, Cheng J Y, Zhu P M, *et al.* Numerical Simulation of Seam Love Type Channel-Wave and Analysis on Dispersion Features. Coal Science and Technology, 2011, 6 (39): 106-109.
- [27] 杨思通,程久龙. 煤巷小构造 Rayleigh 型槽波超前探测数值模拟. 地球物理学报, 2012, 55(2): 655-662.  
Yang S T, Cheng J L. The method of small structure prediction ahead with Rayleigh channel wave in coal roadway and seismic wave field numerical simulation. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2012, 55(2): 655-662.
- [28] 姬广忠,程建远,朱培民等. 煤矿井下槽波三维数值模拟及频散分析. 地球物理学报, 2012, 55(2): 645-654.  
JI G Z, Cheng J Y, Zhu P M, *et al.* 3-D numerical simulation and dispersion analysis of in-seam wave in underground coal mine. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2012, 55(2): 645-654.
- [29] 杨真,冯涛, Wang Shugang. 0.9 m 薄煤层 SH 型槽波频散特征及波形模式. 地球物理学报, 2010, 53(2): 442-449.  
Yang Z, Feng T, Wang S G. Dispersion characteristics and wave shape mode of SH channel wave in a 0.9m-thin coal seam. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2010, 53(2): 442-449.
- [30] 杨小慧,李德春,于鹏飞. 煤层中瑞利型槽波的频散特性. 物探与化探, 2010, 34(6): 750-752.  
Yang X H, Li D C, Yu P F. Analysis of Rayleigh Channel Wave Dispersion in Coal Seam. Geophysical & Geochemical Exploration, 2010, 34(6): 750-752.
- [31] Tao W P, Dong S H, Li Y. Forward modeling to improve seismic reflection energy of a protective coal seam based on Zoeppritz equation. J China Univ Mining & Technol, 2008 (18): 0046-0049.
- [32] Li X P. Elimination of higher modes in dispersive in-seam multimode Love waves. Geophysical Prospecting, 1997 (45) 945-961.
- [33] 刘天放,程九龙,潘冬明等. 槽波的吸收衰减. 煤炭学报, 1983, 18(5): 83-86.  
Liu T F, Cheng J D, Pan D M, *et al.* The Attenuation of Channel Waves. Journal of China Society, 1983, 18(5): 83-86.
- [34] Yang Z, Ge M C, Wang S G. Characteristics of transmitting channel wave in a coal seam. Mining Science and Technology, 2009(19): 0331-033.
- [35] 孙瑞霞,张雯雯,黄晓玲. 煤田地震勘探的新方法——槽波地震勘探. 河北建筑科技学院学报, 1998, 15(3): 59-72.  
Sun R X, Zhang W J, Huang X L. A New Method of Seismic Prospecting in Coalfield. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 1998, 15(3): 59-72.
- [36] 冯宏,李天元,杨元梅等. 印度冈瓦纳系煤层槽波探测技术的适应性. 煤田地质与勘探, 1999, 27(3): 68-70.  
Feng H, Li T Y, Yang Y M, *et al.* The Adaptation of Seismic Wave Technique for The Coal Seams in Gondwana System of India. Coal Geology & Exploration, 1999, 27(3): 68-70.
- [37] 滕吉文. 高频反射波在实际断层介质中传播的动力学特征. 地球物理学报, 1963, 5(2): 166-178.  
Teng J W. The Propagation Dynamic Characteristics of High-Frequency Reflection Wave in The Actual Fault. Chinese Journal of Geophysics, 1963, 5(2): 166-178.
- [38] 王文德,赵炯,王谊等. 槽波反射法探测效果的影响因素及改进措施. 煤田地质与勘探, 1996, 25(1): 57-61.  
Wang W D, Zhao J, Wang Y, *et al.* The Affecting Factors and Innovations of In Seam Seismic Exploration. Coal Geology & Exploration, 1996, 25(1): 57-61.
- [39] 王伟,高星,李松营,等. 槽波层析成像方法在煤田勘探中的应用——以河南义马矿区为例. 地球物理学报, 2012, 55(3): 1054-1062.  
Wang W, Gao X, Li S Y, *et al.* Channel wave tomography method and its application in coal mine exploration: An example from Henan Yima Mining Area. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2012, 55(3): 1054-1062.
- [40] Erich D. Guy, Richard C. Nolen-Hoeksema, Jeffrey J. Daniels, *et al.* High-resolution SH-wave seismic reflection investigations near a coal mine-related roadway collapse feature. Journal of Applied Geophysics, 2003(54): 51-70.
- [41] Xu Y Z, Cui R F, Huang W C, *et al.* Reflectivity forward modeling and a CSSI method seismic inversion study of igneous intrusive area, and gas-enriched area located within a coal seam. Mining Science and Technology, 2009 (19): 457-462.
- [42] Li D H, Dong S H, Zhang C, *et al.* Application of micro-seismic facies to coal bed methane exploration. Mining Science and Technology(China), 2011(21): 743-747.
- [43] M. Ge, H. Wang, H. R. Hardy Jr., *et al.* Void detection at an anthracite mine using an in-seam seismic method. International Journal of Coal Geology, 2008(73): 201-212.
- [44] Hu Y R, George A, McMechan. Imaging mining hazards within coalbeds using prestack wave equation migration of in-seam seismic survey data; A feasibility study with synthetic data. Journal of Applied Geophysics, 2007(63): 24-34.
- [45] KABIESZ Józef, MAKÓWKA, Janusz. Empirical-analytical method for evaluating the pressure distribution in the hard coal seams. Mining Science and Technology, 2009(19): 0556-0562.
- [46] H. Kang, X. Zhang, L. Si, *et al.* In-situ stress measurements and stress distribution characteristics in underground coal mines in China. Engineering Geology, 2010(116): 333-345.
- [47] Zhu S Y, Jian Z Q, Hou H L, *et al.* Analytical model and application of stress distribution on mining coal floor. J China Univ Mining & Technol, 2008(18): 0013-0017.
- [48] Xu Y Z, Huang W C, Chen T J, *et al.* An evaluation of deep thin coal seams and water-bearing/resisting layers in the quaternary system using seismic inversion. Mining Science and Technology, 2009(19): 0161-0165.
- [49] Sun J, Wang L G, Wang Z S, *et al.* Determining areas in an inclined coal seam floor prone to water-inrush by micro-seismic monitoring. Mining Science and Technology(China), 2011(21): 165-168.