

# 采煤工作面地质异常体透射槽波探测技术

王季李 刚 吴国庆 牛欢 刘硕 王保利

(中国煤炭科工集团西安研究院有限公司 陕西 西安 710077)

**摘要:** 针对大型采煤工作面内出现多种地质异常体须探测的问题,采用透射槽波能量衰减系数CT成像技术在多个矿井工作面内分别对断层、陷落柱、薄煤带3种典型地质异常体进行探测。将探测结果与后期收集的验证资料对比表明:透射槽波在遇断层、陷落柱以及薄煤带时,能量有明显的衰减现象;槽波能量衰减系数CT成像结果能够有效反映多种地质异常体的位置与范围;地质异常体衰减系数为0.03~0.06,不同类型异常体的衰减系数有一定差异但并不显著。

**关键词:** 透射槽波;地质异常体;衰减系数;CT成像

中图分类号: P631.8 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)06-0159-05

## Transmitted channel wave detecting technology of geologic anomalous body in coal mining face

Wang Ji, Li Gang, Wu Guoqing, Niu Huan, Liu Shuo, Wang Baoli

(Xi'an Research Institute Company Limited, China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** According to the detection of multiple types of geologic anomalous bodies occurred in large coal mining face, the transmitted channel wave energy attenuation coefficient CT image technology was applied to detect the fault, sinkhole and thin seam zone three typical geologic anomalous bodies in several coal mining faces. The comparison between the detection results and the late collected verified information showed that the energy of the transmitted channel wave in the fault, sinkhole and the thin seam zone would have obvious attenuation phenomenon. The seismic channel wave energy attenuation coefficient CT results could effectively reflect the location and scope of several geologic anomalous bodies. The attenuation coefficient of a geologic anomalous body was 0.03 ~ 0.06 and attenuation coefficients of different type anomalous bodies would have a certain difference but would not be obvious.

**Key words:** transmitted channel wave; geologic anomalous body; attenuation coefficient; CT image

## 0 引言

随着我国机械化采煤技术的不断提高,所形成的工作面规模越来越大。工作面规模的增大使得其内部包含断层、陷落柱等地质异常体的可能性也随之增大。尤其是一些隐伏构造,如延伸长度较小的断层、直径较小的陷落柱等,在工作面的上、下平巷没有露头,很容易被忽视<sup>[1]</sup>。但是这些隐伏地质异常体轻则影响综采设备的正常采煤,降低生产效率,重则形成瓦斯聚集或与含水层导通而引发安全事故<sup>[2]</sup>。因此,查清工作面内地质异常体发育情况,

对于大型工作面的安全、高效开采具有重大意义。

槽波具有传播距离长的特点,非常适合大型工作面内部的探测<sup>[3]</sup>。当槽波遇到煤层中的地质异常体时,槽波速度和能量将发生改变<sup>[4]</sup>。透射槽波探测法就是从接收到的槽波数据中利用层析成像技术,反演煤层物性参数,从而对煤层中地质异常体成像<sup>[5]</sup>。1981年,Mason首先利用代数重建算法反演煤层速度<sup>[6-7]</sup>。1987年,Krajewski对Schwalback煤层进行透射测量,研究了实测频散曲线与理论值的关系<sup>[8]</sup>。1998年,Parra等<sup>[9]</sup>利用透射导波对低速介质成像。2007年、2015年,Yancey等<sup>[10-11]</sup>利用

收稿日期: 2016-04-08;责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.06.026

基金项目: 科技部科研院所技术开发研究专项资助项目(2014EG122201); 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05040-002)

作者简介: 王季李(1977—),男,陕西西安人,副研究员。Tel: 15202486060 E-mail: wangji@cctegxian.com

引用格式: 王季李,刚,吴国庆,等. 采煤工作面地质异常体透射槽波探测技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 159-163, 193.

Wang Ji, Li Gang, Wu Guoqing et al. Transmitted channel wave detecting technology of geologic anomalous body in coal mining face [J]. Coal Science and Technology 2016, 44(6): 159-163, 193.

透射和反射槽波探测煤矿采空区。我国透射槽波工程开展较早,1993 年,杨元海<sup>[12]</sup>提出了相对透射系数成像方法,并在多个矿区取得了较好的探测效果。近年来,随着大型工作面对探测距离与精度的要求不断提高,透射槽波再次成为了研究热点<sup>[13-14]</sup>,并针对不同探测目标提出了新的成像方法,如槽波能量衰减系数 CT 成像方法(能量法)<sup>[15-16]</sup>、槽波速度 CT 成像方法(速度法)<sup>[17-18]</sup>等。其中能量法具有简单、直观、构造适应性强等特点。笔者及所在团队采用能量法在我国多个矿井开展了井下试验与工程示范,通过实际应用验证方法的有效性。

## 1 透射槽波能量法探测原理

槽波是弹性波在煤层与顶底板的分界面上发生全反射而产生的干涉波。在单一稳定的煤层中传播时,槽波被禁锢于煤层中,能量损失较少,速度与频率基本保持不变。当槽波遇到地质异常体时,能量(振幅)、速度、频率等特征将会发生变化,且变化的程度与地质异常体的类型与性质相关。

当遇到断层时,槽波在煤岩界面上发生反射的角度改变,不再满足全反射条件,将有部分能量泄露到围岩中。如果断层落差小于煤厚,如图 1a 所示,部分槽波仍能在未完全断开的煤层中形成全反射条件,继续形成槽波。此时接收到的槽波能量有一定衰减,且衰减的程度与断层落差有关。如果断层落差大于煤厚,如图 1b 所示,则槽波能量几乎全部散失,仅有很少一部分重新进入煤层,在煤层中二次激发后重新形成槽波。此时接收到的槽波能量很弱,在单炮记录上几乎无法识别。

当槽波遇到陷落柱时,如图 1c 所示,与大于煤厚断层的情况类似,由于全反射条件不满足,大部分槽波能量将散失在陷落柱与围岩中,仅有很少一部分重新进入煤层,二次激发后重新形成槽波。但是由于陷落柱在水平方向上的规模一般小于断层,在水平方向上频率较低、波长较长的槽波会绕过陷落柱重新发生干涉。因此陷落柱对高频槽波的衰减作用更为明显。

当槽波遇到冲刷带等煤厚变薄区时,如图 1d 所示,与小于煤厚断层的情况类似,一部分槽波散失,另一部分槽波仍能满足全反射条件,从变薄的煤层中透过。因此薄煤带表现为槽波能量有一定衰减,且衰减程度与煤厚有关。

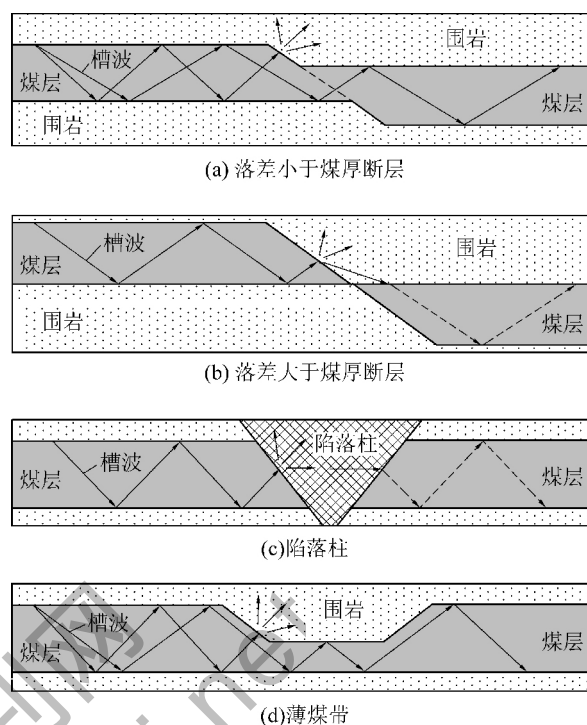


图 1 透射槽波工作面探测示意

Fig. 1 Schematic diagram of channel wave transmitting in coal seam

## 2 透射槽波能量衰减系数 CT 成像

透射槽波施工时,在采煤工作面的一侧巷道中安装检波器,而在另一侧巷道中激发炸药。每一对炮点、检波点构成一条射线。设在一条射线上,槽波激发时振幅为  $A_s$ ,透过工作面后被检波器接收时振幅为  $A_r$ 。若射线长度为  $x$ ,则有<sup>[5]</sup>:

$$A_r = A_s e^{-\beta x} \quad (1)$$

式中  $\beta$  为槽波在这条射线上总的能量衰减系数。

如果将整个工作面网格化,分成  $N$  个网格,射线穿过第  $n$  个网格时形成的路径长度为  $x_n$ 。当这条射线不通过第  $n$  个网格时,则  $x_n = 0$ 。设第  $n$  个网格内槽波的衰减系数为  $\beta_n$ ,则式(1)可以写成

$$\sum_{n=1}^N \beta_n x_n = \ln A_s - \ln A_r \quad (2)$$

每个网格对应的衰减系数与该网格内介质的岩性有关,是需求出的未知量。 $x_n$ 可由观测系统中计算出  $A_s$  与  $A_r$  从采集的数据中获得。由这些已知量反演出  $\beta_n$  就可以获得工作面内各个网格内介质对槽波的衰减作用,从而判断地质异常体的位置与形态。

式(2)是一条射线满足的方程,对于所有射线,可将式(2)写成矩阵形式:

$$Xb = a \quad (3)$$

其中  $X$  为  $M \times N$  的矩阵,表示  $M$  条射线在  $N$  个网格中的传播距离;  $b$  为  $N$  维向量  $a$  为  $M$  维矢量,即有

$$b = (\beta_1 \ \beta_2 \ \cdots \ \beta_N); \quad a = (\alpha_1 \ \alpha_2 \ \cdots \ \alpha_M)$$

$$\alpha_m = \ln A_{sm} - \ln A_{rm} \quad m \in [1, M]$$

式中:  $A_{sm}$  为第  $m$  条射线上槽波激发点的槽波振幅;  $A_{rm}$  为在接收点上采集到的槽波振幅。

由于式(3)是一个欠定方程,一般采用代数重建法(ART)或联合迭代重建法(SIRT)求解<sup>[19-20]</sup>。通过迭代得到  $b$  向量的值,从而得到工作面内各个网格内介质对槽波的衰减系数。其中高衰减区域一般对应断层、陷落柱等异常区。

### 3 地质异常体探测实例

#### 3.1 断层探测实例

皖北煤电刘桥一矿 45301 工作面长度 1 000 m,宽度为 240 m,主采煤层平均厚度 2 m,顶板为灰黑色块状泥岩,厚度 2.8 m,底板为砂质泥岩,厚度 1.8 m。巷道揭露数条落差 0.8 ~ 2.5 m 的断层。为查清工作面内断层分布情况,采用透射槽波法进行探测。在工作面的上下巷共布置检波点 223 道,道间距 10 m;炮孔 110 个,孔深 3 m,孔间距 20 m。

采集所得的数据如图 2 所示。槽波的右边能量较强,波形完整连续;而左边在图中红色箭头标出的位置处存在明显的中断,槽波能量很弱,这是落差大于煤厚的断层所带来的影响。

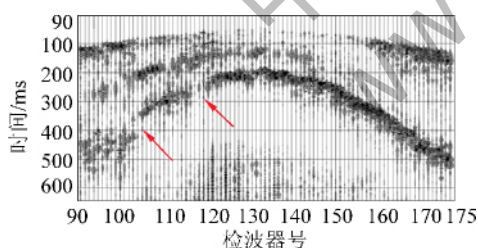


图 2 45301 工作面透射槽波数据

Fig. 2 Data of transmission in-seam wave in No. 45301 mining face

从数据中提取出每一道的对数振幅比,再将整个工作面划分成  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  的网格,由式(3)反演出每个网格的槽波衰减系数,就可以得到工作面的透射槽波能量 CT 成像图。如图 3 所示,蓝色区域衰减系数低,表示槽波能够正常穿过;红色区域衰减系数高,表示槽波传播到此处时被阻断,则此处可能存在断层或其他地质异常体。根据成像结果以及相关

地质资料最终解释了 5 条断层,如图 3 所示,其中 CF1、CF2、CF3 和 CF5 断层位置与上下巷的实际揭露情况一致,CF4 断层为隐伏断层。

为了验证工作面内断层实际发育情况,布置了 1 条探巷对 CF1 和 CF2 断层进行验证,位置如图 3 中白线所示,经验证 CF1 断层为正断层,落差  $h = 1 \text{ m}$ ; CF2 断层为正断层,落差为 6 m,其位置与槽波探测的结果相一致。图 3 中左侧为探巷揭露的煤层剖面图。可以看出,成像结果中能量的高衰减区域与实际断层位置较为吻合。

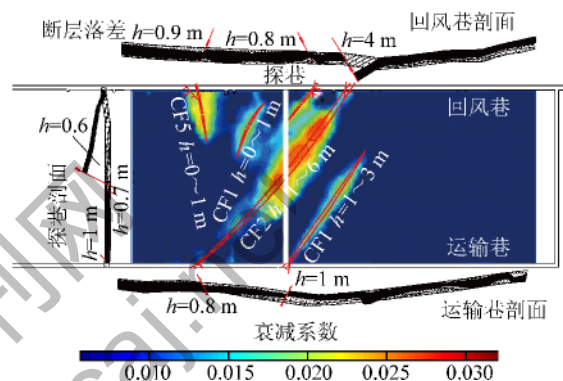


图 3 45301 工作面成像结果与推测断层及探巷揭露情况

Fig. 3 Tomography result and predictive faults contrast with tunnel exposed faults in No. 45301 mining face

#### 3.2 陷落柱探测实例

皖北煤电刘桥一矿 II468 工作面合采 3、4 号煤层,其中 3 号煤层平均厚度 1.2 m,4 号煤层平均厚度 1.7 m。3 号煤层与 4 号煤层间含有 1 层夹矸,厚度 0.3 ~ 0.5 m。工作面内煤层与围岩的物性(密度、速度)差异较大,故煤层与围岩的波阻抗差异明显,利于槽波在煤层中传播。

工作面开切眼处揭露 1 个直径大于 20 m 的疑似陷落柱,附近裂隙发育。为了进一步查明该疑似陷落柱的性质和发育情况,以及工作面内可能存在的其他地质异常体,采用透射槽波法进行探测。本次探测共布置炮点 31 个,炮间距 40 m,在开切眼附近炮点加密为间距 20 m,炮孔深 3 m。检波点 80 个,道间距 10 m。

图 4 为桩号 R111 的检波点接收到的共检波点道集,可以看出其中 1—5 号炮点之间能量较弱,而其他道能量较强。初步判断是切眼处陷落柱阻碍了槽波的传播。II468 工作面透射槽波能量 CT 成像图如图 5 所示,可以看出开切眼处有半椭圆型的较强能量衰减区,初步判断为陷落柱。

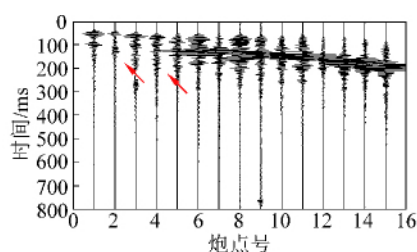


图 4 II468 工作面透射槽波数据

Fig. 4 Data of transmission channel wave in No. II468 mining face

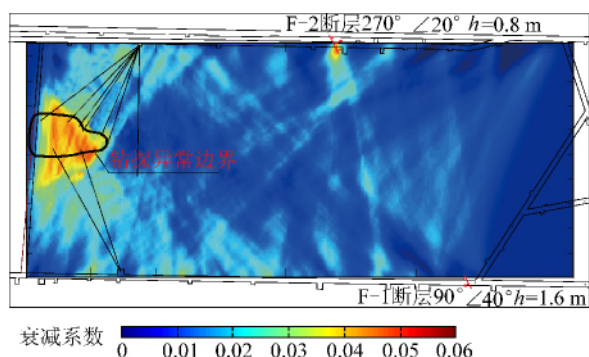


图 5 II468 工作面成像结果与钻探验证情况

Fig. 5 Tomography result contrast with drill exposed in No. II468 mining face

根据成像结果从上下巷分别向工作面内打钻验证,并根据钻孔揭露情况圈定陷落柱边界,钻孔与根据钻探推测的陷落柱边界如图 5 中黑色直线与线条所示。可以看出,成像结果中的能量异常区域与钻探圈定的陷落柱基本重合,边界略大于钻探。这主要是因为靠近开切眼处射线密度不足,影响了成像的分辨率。另外,上下巷各揭露 1 条断层,在成像图上并不明显。这是因为此断层对槽波能量的衰减作用与陷落柱相比要弱得多,而且本次工程设计的观测系统不够合理,炮点数与检波点数都过少,大巷方向炮间距过大,使得采集噪声很难压制,影响了断层的成像质量。

### 3.3 薄煤带探测实例

某矿 215041 工作面长 1 850 m,宽 200 m,主采煤层为 5 号煤,赋存稳定,平均煤厚 10.68 m。回风巷掘进至 875 ~ 900 m 段,煤厚逐渐变薄至 0.3 m,从 900 ~ 1 284 m 段,煤厚平均在 0.7 m,从 1 284 ~ 1 288 m 段煤厚由 0.5 m 急剧增厚至 10 m。回风巷的素描如图 6 所示。

为了探测 215041 工作面内薄煤带的分布范围,采用包围整个工作面的方式,同时在进风巷、回风巷和切眼布置测线。测线布置如图 6 所示。测线总长

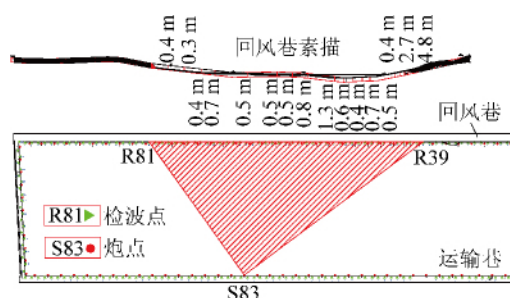


图 6 215041 工作面测点布置与回风巷素描

Fig. 6 Layout of survey point in No. 215041 mining face and sketch of air roadway

度 2 000 m,探测面积 900 m × 200 m,共计检波点 201 个,道间距 10 m;炮点 100 个,炮间距 20 m。图 7 为运输巷 S83 炮激发,回风巷 R11 至 R100 道接收的透射槽波数据。可以明显看出从 R39 至 R81 之间槽波能量严重减弱,这段范围对应了回风巷素描图中煤厚变薄的区域,同时也说明薄煤带处于 S83、R39 与 R81 三个点所形成的三角区域内,如图 6 红色阴影区所示。

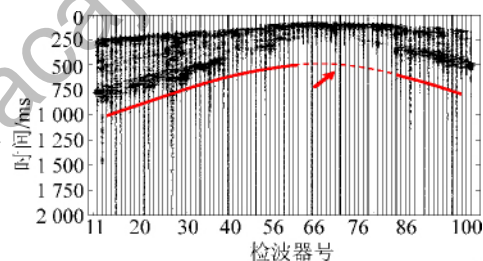


图 7 215041 工作面透射槽波数据

Fig. 7 Data of transmission channel wave in No. 215041 mining face

采用透射槽波能量 CT 算法所得到的成像结果如图 8 所示。可以看出红蓝边界区域界线明显,距离回风巷最远距离为 120 m。

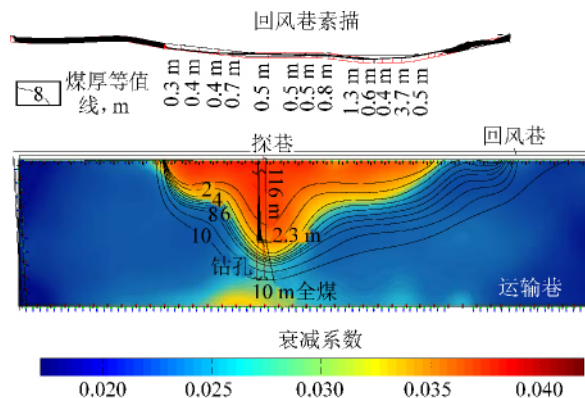


图 8 215041 工作面成像结果与巷探验证情况

Fig. 8 Tomography result contrast with tunnel exposed in No. 215041 mining face

根据成像结果以及回风巷煤厚素描图,推测的工作面内煤厚等值线如图 8 中黑色样条曲线所示。从回风巷向工作面内开掘进探巷,前 90 m 揭露的煤厚小于 1.0 m,从距离回风巷 90 m 到 116 m 处煤厚逐渐增加到 2.3 m。矿方又从 116 m 的探巷掘进工作面向内打钻,钻孔资料显示煤厚很快增加到 10 m 全煤厚。从巷探与钻探结果上看,成像结果与实际揭露吻合得较好。

## 4 结 论

1) 采煤工作面内煤层的连续性与透射槽波能量的强弱有着密切的关系。因此,对接收到的透射槽波进行处理,提取槽波达到时间范围内的平均振幅,就可以直接判断煤层中从震源点到接收点之间的射线上是否存在地质异常体。通过进一步的透射槽波能量衰减系数 CT 成像,可以得到工作面内地质异常体的整体分布情况。一般先根据 CT 成像结果确定地质异常体的大体位置及范围,再仔细研究通过成像异常区域的每一条射线,最终根据射线确定地质异常体的边界。

2) 透射槽波的能量衰减系数 CT 成像对工作面内多种常见的地质异常体,如断层、陷落柱、薄煤带等都有较好的探测性能。

3) 根据给出的 3 个工程实例以及其他矿区的探测工程的经验,一般异常地质体的衰减系数为 0.03 ~ 0.06。不同类型的地质异常体的衰减系数略有差异,如断层一般为 0.020 ~ 0.035,薄煤带为 0.025 ~ 0.040,陷落柱为 0.03 ~ 0.06。总体上来看,衰减系数与煤层的连续程度相关。当煤层全部断开时,衰减系数一般大于 0.03,而当无煤区域在平面上面积较大时,如无煤带和陷落柱,则衰减系数会更大一些。

4) 虽然断层、陷落柱和薄煤带 3 种异常体的衰减系数有一定差异,但在目前的成像方法下差异并不显著。因此仍需要结合成像结果中异常区的形态以及巷道揭露情况,对地质异常体的类型进行综合判断。

## 参考文献 (References):

[1] 张拥军,杨登峰,陈关平,等.含隐伏小断层底板采动突水机理数值模拟研究[J].煤炭科学技术,2014,42(10):45-47,52.  
Zhang Yongjun, Yang Dengfeng, Chen Guanping, et al. Numerical simulation research on activation water inrush mechanism of mining

floor with concealed minor faults [J]. Coal Science and Technology 2014, 42(10): 45-47, 52.

- [2] 杜文凤,彭苏萍,师素珍,等.深部隐伏构造特征地震解释及对煤矿安全的影响[J].煤炭学报,2015,40(3):640-645.  
Du Wenfeng, Peng Suping, Shi Suzhen, et al. Seismic interpretation of deep buried structure characteristics and its influence on coal mine safety [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 640-645.
- [3] 任亚平.槽波地震勘探在煤矿大型工作面的应用[J].煤炭地质与勘探,2015,43(3):102-104.  
Ren Yaping. Application of ISS in super large coal face [J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(3): 102-104.
- [4] 程建远,姬广忠,朱培民,等.典型含煤模型 Love 型槽波的频散特征分析[J].煤炭学报,2012,37(1):68-72.  
Chen Jianyuan, Ji Guangzhong, Zhu Peimin, et al. Love Channel Waves dispersion characteristic analysis of typical coal models [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 68-72.
- [5] 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[J].地球物理学报,2012,55(2):645-654.  
Ji Guangzhong, Cheng Jianyuan, Zhu Peimin, et al. 3-D numerical simulation and dispersion analysis of in-seam wave in underground coal mine [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2): 645-654.
- [6] Mason I M, Buchanan D J, Boorer A K. Channel wave mapping of coal seams in the United Kingdom [J]. Geophysics, 1980, 45(7): 1131-1143.
- [7] Mason I M. Algebraic reconstruction of a two-dimensional velocity inhomogeneity in the High Hazles seam of Thoresby Colliery [J]. Geophysics, 1981, 46(3): 298-308.
- [8] Krajewski P, Dresen L, Schott W, et al. Studies of roadway modes in a coal seam by dispersion and polarization analysis: a case history [J]. Geophysical Prospecting, 1987, 35(7): 767-786.
- [9] Parra J O, Zook B J. Transmission and detection of guided seismic waves in attenuating media [J]. Geophysics, 1998, 63(4): 1190-1199.
- [10] Yancey D J, Imhof M G, Feddock J E, et al. Analysis and application of coal-seam seismic waves for detecting abandoned mines [J]. Geophysics, 2007, 72(5): M7-M15.
- [11] 王 季.反射槽波探测采空巷道的实验与方法[J].煤炭学报,2015,40(8):1879-1885.  
Wang Ji. Experiment and method of void roadway detection using reflected in-seam wave [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1879-1885.
- [12] 杨元海.槽波速度谱相对透射系数图法[J].煤田地质与勘探,1993,21(4):53-56.  
Yang Yuanhai. The method for relative transmittance map of seam-wave velocity spectrum [J]. Coal Geology & Exploration, 1993, 21(4): 53-56.
- [13] 段明道.槽波地震勘探技术实践[J].中州煤炭,2014(10):105-107.

(下转第 193 页)

- [14] 李 磊, 柏建彪, 王襄禹. 综放沿空掘巷合理位置及控制技术[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1564 – 1569.  
Li Lei, Bai Jianbiao, Wang Xiangyu. Rational position and control technique of roadway driving along next goaf in fully mechanized top coal caving face[J]. Journal of china coal society, 2012, 37(9): 1564 – 1569.
- [15] 张科学, 张永杰, 马振乾, 等. 沿空掘巷窄煤柱宽度确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 446 – 452.  
Zhang Kexue, Zhang Yongjie, Wang Xiangyu, et al. Determination of the narrow pillar width of gob – side entry driving[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(4): 446 – 452.
- [16] 门建光, 王 硕, 袁瑞甫, 等. 倾斜煤层煤柱覆岩结构特征及应力分布规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(5): 21 – 24.  
Men Jianguang, Yuan Ruifu, Li Xiaojun, et al. Study on overburden strata structure features and stress distribution law of coal pillar in inclined seam[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(5): 21 – 24.
- [17] 王 猛, 柏建彪, 王襄禹, 等. 深部倾斜煤层沿空掘巷上覆结构稳定与控制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(3): 426 – 432.  
Wang Meng, Bai Jianbiao, Wang Xiangyu, et al. Stability and control technology of overlying structure in gob – side entry driving roadways of deep inclined coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(3): 426 – 432.
- [18] 缪协兴, 钱鸣高. 采动岩体的关键层理论研究新进展[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 25 – 25.  
Miao Xiexing, Qian Minggao. Advance in the key strata theory of mining rockmass[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(1): 25 – 25.
- [19] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(3): 225 – 230.  
Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of china coal society, 1996, 21(3): 225 – 230.
- [20] 许永祥, 李化敏, 王开林, 等. 特厚煤层综放工作面侧向支撑压力分布研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(11): 26 – 28.  
Xu Yongxiang, Li Huamin, Wang Kailin, et al. Study on lateral support pressure distribution of fully – mechanized coal mining face in ultra thick seam[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(11): 26 – 28.
- (上接第 163 页)
- Duan Mingdao. Practice of channel wave seismic exploration technology[J]. Zhongzhou Coal, 2014(10): 105 – 107.
- [14] 申青春, 杨参参, 王 康, 等. 透射法槽波地震勘探技术在工作面探测中的应用研究[J]. 中州煤炭, 2015(7): 105 – 107, 110.  
Shen Qingchun, Yang Cancan, Wang Kang, et al. Application study on in – seam seismic survey using transmission method on exploration of working face[J]. Zhongzhou Coal, 2015(7): 105 – 107, 110.
- [15] 姬广忠, 程建远, 胡继武, 等. 槽波衰减系数成像方法及其应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S2): 471 – 475.  
Ji Guangzhong, Cheng Jianyuan, Hu Jiwu, et al. In – seam wave imaging using attenuation coefficient: method and application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2): 471 – 475.
- [16] 王 季, 李建政, 吴 海, 等. 透射槽波能量衰减系数成像与陷落柱探测[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 108 – 111.  
Wang Ji, Li Jianzheng, Wu Hai, et al. Tomography of transmission in – seam wave attenuation coefficient and detection of collapse columns[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 108 – 111.
- [17] 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[J]. 地球物理学报, 2012, 55(3): 1054 – 1062.  
Wang Wei, Gao Xing, Li Songying, et al. Channel wave tomography method and its application in coal mine exploration: An example from Henan Yima Mining Area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(3): 1054 – 1062.
- [18] 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[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 439 – 451.  
Hu Guoze, Teng Jiwen, Pi Jiaolong, et al. In – seam seismic exploration techniques: a geophysical method predicting coal – mine disaster[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(1): 439 – 451.
- [19] 卢文凯, 尹芳芳. Adaptive algebraic reconstruction technique[J]. Medical physics, 2004, 31(12): 3222 – 3230.
- [20] Trampert J, Leveque J J. Simultaneous iterative reconstruction technique: physical interpretation based on the generalized least squares solution[J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(8): 12553 – 12559.