

槽波勘探技术在巷道顶板破碎带探测中的应用

廖泽¹, 冯涛^{1*}, 余伟健¹, 孙广京²

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 彬县水帘洞煤炭有限责任公司, 陕西 咸阳 713500)

摘要:为进一步探测陕西水帘洞煤矿 ZF3806 工作面回采巷道顶板围岩的破裂状态, 指导回采期间巷道加强支护, 对工作面煤层及其顶底板岩石进行超声波波速测定, 并采用槽波地震勘探技术对该工作面进行透射槽波探测. 研究结果表明, 4 号煤层与其顶底板岩层的波速存在明显差异, 为槽波勘探提供了物理基础; 透射槽波 CT 成像解释槽波能量异常区域 6 个, 判定异常区域破碎度大, 裂隙较发育, 建议在工作面回采过程中对异常区域的巷道顶板进行加强支护, 保证工作面的安全回采.

关键词:槽波勘探; 破碎带; 透射槽波; CT 成像

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)01-0001-05

Application of Channel Wave Exploration Technology in Broken Zone Detecting of Roadway Roof

LIAO Ze¹, FENG Tao¹, YU Weijian¹, SUN Guangjing²

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Binxian County Shuilidong Coal Co., Ltd., Xianyang 713500, China)

Abstract: In order to further explore the fractured state of the roof rock of the ZF3806 working face in Shuilidong Coal Mine, Shaanxi Province, and guide the strengthening of support during the mining period, ultrasonic wave velocity measurement is carried out on the coal seam and its roof and floor rocks of the working face. Slot wave seismic exploration technology is used to conduct transmission slot wave detection on the working face. The research results indicate that there is a significant difference in wave velocity between the 4th coal seam and its roof and floor rock layers, providing a physical basis for trough wave exploration. Transmission slot wave CT imaging interprets 6 abnormal areas of slot wave energy. It is speculated that these abnormal areas have high fragmentation and well-developed fractures. It is recommended to strengthen support for the roof of the abnormal areas during the mining process of the working face to ensure safe mining.

Keywords: channel wave exploration; broken zone; transmission channel wave; CT imaging

地震波在围岩中的传播速度通常比煤层大, 与顶底板围岩相比, 煤层属于低速夹层, 在物理上可以将煤层当成是一种波导; 同时, 煤层属于一种低密度软弱夹层, 煤层与顶底板之间的分界面可以当作一个反射波的分界面, 因此, 地震波勘探能够在煤岩层中进行煤层构造的探测工作.

在地震学的研究中, 波的地震能量在低速层中的制导现象早已被研究过, 但是波在煤层中传播的波导现象直到 1955 年才由 Evison 于新西兰的煤矿中第一次发现^[1], 1963 年, 德国的 Krey 通过理论与实践对槽波在煤层中的传播进行了验证^[2]. 自 20 世纪 70 年代引进槽波探测技术以来, 国内学者进行了大量的理

论研究与实践研究工作^[3].杨真等^[4]进行了薄煤层的槽波探测试验,认为槽波探测薄煤层时选用高低频槽波相结合的方法能够提高探测效果;胡国泽等^[5]全面阐述槽波地震勘探技术的形成原理及其特点,认为该技术可以用于煤层中的一些地质构造的探测.同时,槽波探测技术在煤矿工作面小构造探测中应用广泛,如在山西龙泉矿区、河南义马矿区等均取得了较好的应用效果^[6-9].此外,对于煤矿工作面中陷落柱的探测,槽波探测也是一种非常有效的手段^[10-11].王季^[12]针对槽波探测过程中其他波场的干扰问题,优化了算法与成像结果,研究表明槽波的探测距离在 200 m 以上,传播距离在 360 m 以上;李江华等^[13]提出将槽波地震精细化探测技术用于煤层地质构造探测,且对数据处理流程进行了优化;梁红波等^[14]研究了不同断层状态对槽波探测结果的影响,认为断层与巷道的夹角对探测结果有一定的影响;范德元等^[15]在阳泉矿区成功应用槽波技术探测地质异常体,认为槽波探测技术可以为矿井地质透明化和工作面安全生产提供保障;张万鹏等^[16]建立多种观测系统模型和数据解译方法,并进行验证,认为结合现场实际情况合理选择模型与方法能有效提高槽波探测效果.以上研究成果对槽波探测技术的理论与实际应用进行了较为详细的阐述,表明了该方法具有探测范围广、精度高、抗干扰以及结果直观等优点,但在以上研究中该方法大多应用于断层的探测,对于厚煤层中破碎带探测的研究较少.

陕西水帘洞煤矿 ZF3806 工作面机巷和风巷掘进过程中揭露多条小断层,顶板破碎,且从停采线至切眼方向,煤厚变化明显,工作面平均煤厚 6.38 m.为了进一步确定该巷道顶板煤岩体破碎状态及破碎范围,选用槽波地震勘探法来判断煤岩层中的不连续面及破碎带,为巷道的支护方案提供更多依据.

1 工作面地质概况

ZF3806 工作面位于+770 水平三采区南段.ZF3806 运输巷北部与 ZF3804 采空区相邻,考虑到采空区的应力传递及施工因素,该巷道与 ZF3804 采空区之间留有 24 m 保护煤柱.ZF3806 回风巷南部为本矿井田边界,与虎神沟煤矿井田相邻,西段矿井边界煤柱与大佛寺煤矿井田相邻,东至 ZF3806 工作面停采线.巷道设计走向长度 905 m,巷道埋深 320~370 m,平均埋深 335 m.4 号煤层平均厚为 6.38 m,煤层垂直节理裂隙发育.该工作面的煤岩柱状图如图 1 所示.




岩性	厚度/m	岩性描述	柱状
粉细砂岩	2.5	浅灰,粉细砂岩互层,水平、波状层理,含植物化石	
4煤	6.4	黑色,暗煤为主,夹亮煤,块状,光泽暗淡,垂直节理裂隙较发育,充填方解石脉	
铝质泥岩	2.0	浅灰,团块状,较松软,参差状断口	

图 1 ZF3806 工作面煤岩柱状图

2 槽波勘探方法原理

2.1 岩层超声波试验

本次试验采用的超声波检测仪器为中科院研发的 RSM-SY5 型数字式超声波检测仪,其工作原理为:从试样一端的传感器激发超声波,超声波沿试样轴向传播,另一端的传感器完成接收且统计出传播时间;根据测得的试样长度及超声波从试样一端到另一端传播的时间,确定试样的超声波波速.岩样取自 ZF3806 工作面回采巷道顶底板及煤帮,加工成标准试样进行超声波测试,试样超声波测试见图 2.

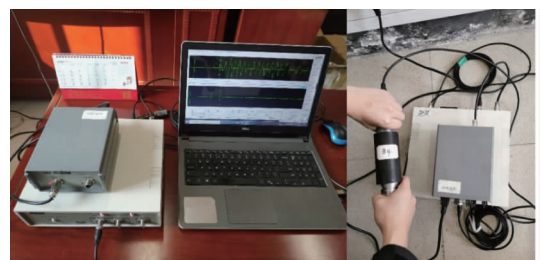


图 2 试样超声波测试

4 号煤层及其顶底板岩层的超声波波速测试结果如表 1 所示.由此可得,4 号煤层的平均波速为 1 205.25 m/s,顶板砂岩的平均波速为 1 668.93 m/s,底板泥岩的平均波速为 2 018.45 m/s,其中煤的超声波波速最低,泥岩的超声波波速最高.

表 1 超声波测试结果

岩样	编号	通过时间/ μs	波速/(m/s)	平均波速/(m/s)
砂岩	R1	31	1 616.13	1 668.93
	R2	29	1 720.34	
	R3	30	1 670.33	
煤	C1	41	1 221.95	1 205.25
	C2	42	1 198.33	
	C3	42	1 195.48	
泥岩	M1	28	1 789.29	2 018.45
	M2	25	1 995.60	
	M3	22	2 270.45	

2.2 槽波形成原理

通过对 4 号煤层的超声波试验可知,煤层与顶底板岩层的物理参数差异明显.在煤层中激发地震波(包括横波和纵波)后,地震波以体波的形式以不同的入射角度向煤层内部传播,如图 3 所示,当入射波到达顶底板界面时,若入射波的角度小于临界角,则大部分地震波将透射到顶底板岩层中,仅少部分地震波能反射回煤层,反射回煤层后地震波经过多次反射迅速衰减;若入射波的角度大于或者等于临界角,则入射到煤层与顶底板界面的地震波将全部反射回煤层中,并将在煤层中形成多次反射,同时持续向前传播,在煤层中相互干涉,相互叠加,形成一个强的干涉扰动,这就形成了槽波.由于槽波只能在煤层中传播,因此槽波的幅频特性能够较全面地反映煤层内的地质构造信息.结合 ZF3806 工作面的实际情况,采用槽波地震勘探法来查明工作面巷道顶板的破碎带及裂隙发育情况.

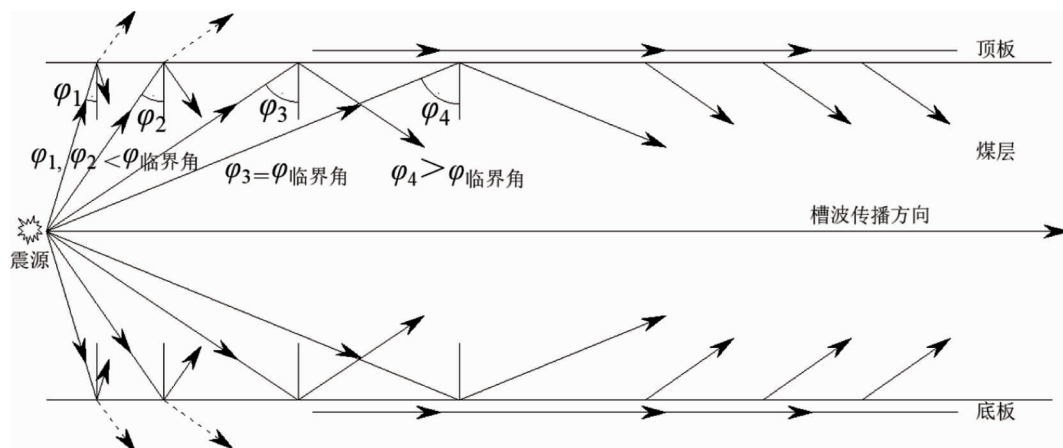


图 3 槽波的形成原理

2.3 透射槽波勘探方法

槽波地震勘探技术是地震勘探技术的一个分支,主要通过煤层中激发并接收地震波来探测煤层中的不连续面以及异常构造等,其探测范围大,探测精度高,波形特征易识别,抗干扰能力强,最终呈现的结果直观准确,是当前煤矿井下最有效的物理勘探方法之一.根据不同的探测条件与要求,目前井下使用的探测方法主要为透射槽波勘探法和反射槽波勘探法.本文选用透射槽波勘探技术对 ZF3806 工作面进行精细化的异常结构探测,在 ZF3806 工作面的两条巷道以及切眼内分别布置震源激发点和检波器接收点,震源点激发的震源信号通过煤层传播到另一侧的检波器,再对接收到的槽波信号进行收集与分析.透射槽波勘探如图 4 所示,炮点(激发点)与检波器(接收点)分别布置在工作面的不同巷道内,依据槽波的透射射线信息来推断相应区域内是否存在异常构造.

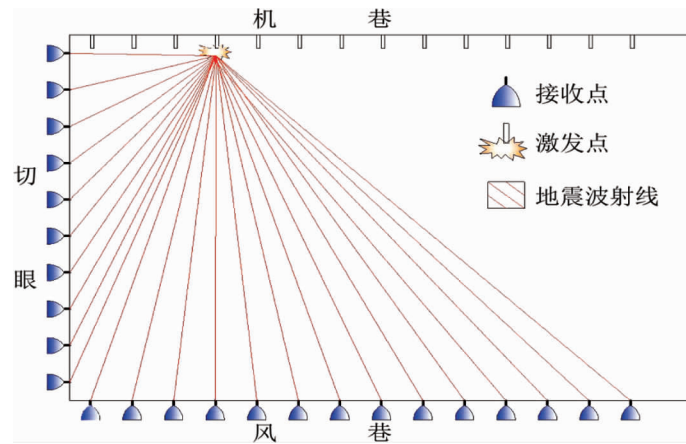


图4 透射槽波法勘探

3 ZF3806 工作面透射槽波勘探布置

本次探测数据采集工作在陕西水帘洞煤矿 ZF3806 工作面进行,共设计炮点 64 个,接收点 96 个.本次探测采用透射观测系统,在 ZF3806 工作面运输巷放炮,在该工作面回风巷和切眼接收.其中炮点位于 ZF3806 工作面运输巷,从运输巷测点 Y3+16 m 开始,向切眼方向依次布置,编号为 S1~S64,相邻炮点间距 15 m;接收检波器布置在 ZF3806 工作面回风巷和切眼,从回风巷开口位置(W1 导线点)开始,向切眼方向及切眼内依次布置,相邻接收点间距 10 m,编号为 R1~R96.观测系统的检波点要求布置在实体煤层部位,将检波器通过转接头固定在稳定的锚杆上.从地震记录上看,槽波发育较好,整体采集数据质量可靠.

4 槽波勘探结果处理与分析

4.1 槽波勘探结果处理

槽波数据处理是对槽波数据进行相关的数学计算和分析,使原始槽波数据的信噪比提高,并从中选取丰富的数据信息和直观的图片信息,提高槽波地震勘探的精度及对地质异常体空间定位识别的精准度.在煤层中,由于煤层的岩性单一且性质稳定,槽波能够迅速穿透整个工作面,同时传播过程中能量衰减系数小,便于识别.在透射观测系统下,当煤层的连续性遭到破坏时,槽波由于受到地质构造的影响会发生传播中断或传播特征变化,检波器接收不到槽波或接收到的槽波的幅频特性发生变化,通过对地震记录上的槽波特征分析,有无槽波便成为判断煤层连续性的最直接的手段.本次透射槽波勘探的数据处理及分析主要使用 KDZ 矿井分布式震波勘探仪系统以及 SCT2.0 矿井震波 CT 成像处理软件.

在进行槽波能量衰减系数计算时,对单炮地震记录进行震源归一化处理,通过时频分析获得槽波的频率和速度范围.地震记录时频分析如图 5 所示,采集的槽波地震记录包含不同阶的振型:基阶振型的埃里相速度约 875 m/s,频率为 135 Hz 左右;一阶振型的埃里相速度约 815 m/s,频率为 280 Hz 左右.

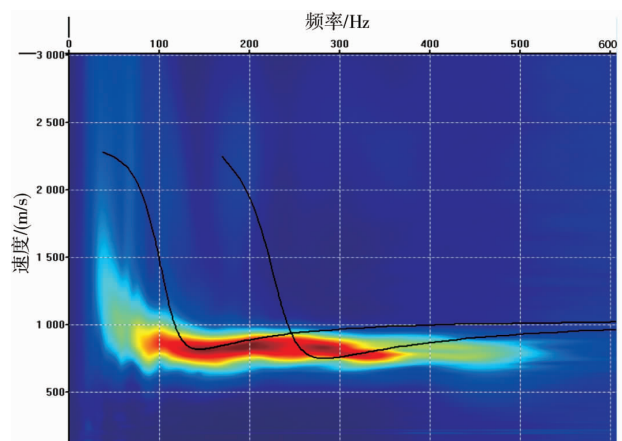


图5 地震记录时频分析

4.2 槽波 CT 成像结果分析

对 ZF3806 工作面切眼至停采线走向长度约 950 m 的范围进行槽波层析成像,如图 6 所示,图 6 中标记 YC1~YC6 的区域代表槽波在该区域内衰减系数大,衰减速度快,将其判定为异常区域;未标记的区域代表槽波在该区域内衰减系数较小,传播速度正常,判定为正常区域.根据基阶槽波能量衰减系数层析成像分布(图 6a)解释异常区域有 6 个,从切眼至停采线方向编号依次为 YC1~YC6,其中切眼附近的 YC1 和 YC2 范围内基阶槽波

的能量衰减较快.为进一步分析切眼附近的地质情况,对一阶槽波进行能量衰减系数层析成像(图6b),一阶槽波能量衰减系数层析成像主要存在4个异常区,与基阶槽波解释的YC1,YC2,YC5及YC6对应.

对比分析基阶和一阶槽波能量衰减系数层析成像,ZF3806工作面切眼至停采线内共解释槽波能量异常区域6个,在异常区域内槽波发育较差,煤层厚度发生变化,推测该6个异常区域煤岩体较破碎,尤其是切眼附近的YC1和YC2范围内,槽波基本不发育,煤岩体破碎范围大,在回采期间极有可能发生片帮、冒落、压架等事故,存在较大安全隐患.

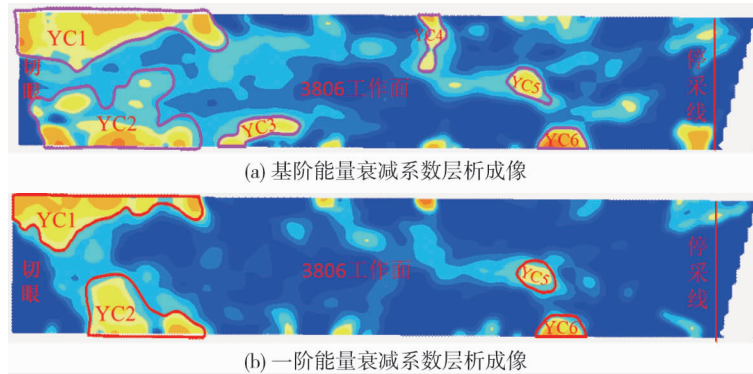


图6 ZF3806工作面槽波层析成像

5 结论

1) 陕西水帘洞煤矿 ZF3806 工作面 4 号煤层与其顶底板岩层存在明显的超声波波速差异,为工作面槽波地震勘探工作提供了基础.

2) ZF3806 工作面煤层内部存在 6 个范围较大的破碎带,破碎带裂隙较发育,在回采期间极有可能出现片帮、冒落、压架等事故,安全隐患风险较大.

3) 槽波勘探技术作为矿井煤层异常带的探查手段,其探测精度与探测范围能够满足大部分回采工作面中煤层破碎带与异常带的探测,其探测结果可为回采工作面的合理布置以及回采巷道的支护提供参考.

参考文献:

- [1] EVISON F F. A coal seam as a guide for seismic energy[J]. Nature, 1955, 176(4495): 1224-1225.
- [2] KREY T C. Channel waves as a tool of applied geophysics in coal mining[J]. Geophysics, 1963, 28(5): 701-714.
- [3] 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.
- [4] 杨真,冯涛,WANG S G. 0.9 m 薄煤层 SH 型槽波频散特征及波形模式[J].地球物理学报,2010,53(2): 442-449.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 武延辉,王伟,滕吉文,等.透射与反射槽波联合探测小构造应用研究:以山西龙泉矿区为例[J].地球物理学进展,2021, 36(3):1325-1332.
- [8] 乐勇,王伟,申青春,等.槽波地震勘探技术在工作面小构造探测中的应用[J].煤田地质与勘探,2013,41(4): 74-77.
- [9] 廉洁,李松营,王伟,等.槽波地震勘探技术在义马矿区的应用[J].煤炭科学技术,2015,43(12):162-165.
- [10] 李刚.透射槽波在煤矿陷落柱探测中的应用[J].煤矿开采,2016,21(3):39-42.
- [11] 李飞,张智,曹志勇,等.陷落柱地震波场特征分析[J].地球物理学进展,2009,24(3): 886-892.
- [12] 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.
- [13] 李江华,廉玉广,窦文武,等.槽波地震反射法探测地质构造应用研究[J].煤炭科学技术,2019,47(12): 201-206.
- [14] 梁红波,曹静,李德春.断层走向对槽波勘探效果的影响分析[J].煤炭技术,2021,40(5):85-88.
- [15] 范德元,吴国庆,马彦龙.槽波技术在阳泉矿区地质异常体探测中的应用研究[J].煤田地质与勘探,2021,49(4):33-39.
- [16] 张万鹏,李松营,姚小帅,等.地震槽波断层探测观测系统设计和数据解译技术[J].煤矿安全,2022,53(2): 142-148.