

基于声波法和 FLAC^{3D}的矿井底板采动破坏特征研究

李 健,于师健,潘 山

(山东科技大学 资源与环境工程学院,山东 青岛 266590)

摘 要:利用声波法对华北地区某典型岩溶水害矿井的 4707 工作面煤层底板不同深度、不同位置的声波波速进行探测,获得了随工作面推进时的波速变化曲线。结果表明:垂深 3.9~12.1 m 之间的声速曲线出现较大的波动,在钻孔距工作面距离 15~5 m 时声波波速迅速升高,在 6~5 m 处达到最大值,工作面推过钻孔后,波速不断降低。垂深 13 m 以上,声波曲线趋于稳定,说明已不在破坏范围内。声速法判断底板最大破坏深度为 12.1 m。结合 FLAC^{3D} 软件,利用 4707 工作面的实际地质资料数值模拟煤层底板采动破坏过程,得出了煤层底板采动破坏特征:底板破坏区沿采空区四周和底板向下扩散呈现出喇叭形,随工作面的不断推进,破坏区也不断前移。

关键词:岩溶水害矿井;声波法;FLAC^{3D};底板破坏特征;数值模拟

中图分类号:TD821

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)06-0057-05

Mining Failure Feature of the Coal Floor Based on Acoustic Method and FLAC^{3D}

LI Jian, YU Shijian, PAN Shan

(College of Resource and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The acoustic method was used to detect the wave velocities of the 4707 working face floor from different depth and locations in a typical karst water disaster mine in North China, and the variation curves of wave velocities along with the advance of the working face were obtained. The results show that the significant fluctuation appears in the variation curves when the vertical depth is between 3.9 m and 12.1 m. The wave velocities rise rapidly when the distance from the drilling to the working face is between 15 m to 5 m, and achieve the maximum value when it is between 6 m and 5 m, but they are reduced gradually when the working face passes the drilling. The variation curves of wave velocities tend to be stable when the vertical depth exceeds 13 m, which reveals that it has not been in the range of damage and that 12.1 m is the maximum damage depth of floor detected by the acoustic method. Combined with FLAC^{3D} software, the mining failure process of the coal floor was simulated by using the actual geological data of the 4707 working face, which is concluded that the failure area presents a horn shape along the goaf around and the floor and that the failure area constantly moves forward along with the advance of the working face.

Key words: Karst water mine; acoustic method; FLAC^{3D}; failure characteristics; numerical simulation

20 世纪 60 年代末期,国外已经将声波探测技术用于岩体探测,研究了岩石的力学性质、岩石裂隙状况等^[1]。20 世纪 70 年代以来,我国水电、铁路、煤炭、石油等部门的勘测中也逐渐应用了声波探测技术,取得了一些重要成果。1986 年,山东矿业学院在华北型煤田奥灰岩溶水防治工业性试验中采用声波法对煤层底板破坏的深度进行了探测,获得成功^[1]。近年来,声波法在国内外成为应用较广泛的探测技术,普遍应用于岩土

收稿日期:2012-08-29

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2011DM014);山东科技大学 2012—2013 年度研究生科技创新基金项目(YCB120102)

作者简介:李 健(1986—),男,山东淄博人,硕士研究生,主要从事矿山压力与岩体控制研究。E-mail:lijianzichuan@163.com
于师建(1962—),男,山东章丘人,教授,博士,主要从事矿井地球物理应用研究。E-mail:ysj7179@163.com

工程、地下工程、工程质量检测、探测不良等地质现象^[1]。本研究采用声波法对华北地区某典型岩溶水害矿井的 4707 工作面煤层底板的破坏情况进行了探测。对华北型岩溶水害矿井的安全生产有重要参考价值。

1 工作面概况

4707 工作面走向长 114 m, 倾斜长 40 m, 煤层倾角 $7^{\circ}\sim 9^{\circ}$, 埋深 445 m。煤厚 7.5 m, 一次采全厚。直接顶为 4 m 页岩, 老顶为 8 m 中细粒砂岩。底板依次为 5 m 铝土质泥岩, 7.5 m 粗粉砂岩, 6 m 页岩, 8 m 灰岩。

2 声波探测

2.1 声波探测基本原理

声波探测技术利用声波或超声波穿过岩体后携带了岩体中的某些信息^[2], 获得岩体的有关力学参数。声波频率高、波长短, 因而分辨率很高。对于声波探测来说, 大多数岩石都近似服从胡克定律。在均匀、各向同性的弹性介质中, 声波传播速度公式为

$$\text{纵波速度: } V_p = \sqrt{\frac{E}{P} \cdot \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}};$$

$$\text{横波速度: } V_s = \sqrt{\frac{E}{P} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}}。$$

其中: E —岩石弹性模量; μ —泊松比; P —岩石密度。

从上述纵波、横波的公式中可知, 波在岩石中的传播速度与岩石的弹性模量 E 、泊松比 μ 和密度 P 有关。在非均匀质岩体中, 声速还与岩体结构有关, 节理不发育、孔隙率小、风化程度低、完整坚硬岩体中, 声速快, 反之则慢。在坚硬完整岩体中, 声能(振幅)衰减少, 波形完整, 类似正弦波, 周期短、频率高、振幅一般较大。而在破碎岩体中, 声能衰减大, 频谱中高频成分大部都被吸收, 因而波形差, 波幅小且不完整。

实践^[3]证明: 岩体受力状态不同, 声速亦不同。声速随应力增大而升高, 最大可上升 40%。采场底板在采动过程中可分成压缩区、膨胀区和采后再压缩区, 在压缩区与膨胀区的分界处为一剪切面。

按一般理论^[4-5]推断, 由于采面前方的压缩区应力增高, 底板原有裂隙被压密, 声波速度比原来高。膨胀区底板岩层发生底鼓而出现层间裂隙, 尤其是剪切面处由于受剪切力比较大, 是底板岩层破坏最为严重的部位, 故剪切带和膨胀区声波速度比原来大大降低。后方冒落压实的再压缩区, 层间裂隙又被压实, 岩体波速相应升高。在采面推进过程中, 煤层底板中任何一点都要先后经受压缩—膨胀—再压缩这样一个过程。即在底板采动影响范围内任何一点的波速在采动过程中必然出现升高—降低—再升高的变化。从以上声波在岩体中的传播特征可知: 原岩工性和原始结构状态不同而声波速度不同, 受采动影响的岩体应力状态发生变化、岩体遭受破坏, 声波速度和波形将发生变化。利用采动前后多次重复观测, 对比采动前后声波速度和波形的变化, 可消除原岩岩性、结构差异影响而突出采动影响。凡在底板一定深度波速和波形有了较大变化就应当视为采动破坏深度。

2.2 探测方案

如图 1 所示, 在 4704 工作面轨道巷布置四个钻孔标号为 2, 3, 7, 8 号。2 号孔位距开切眼 20 m, 沿煤层底板向下倾斜钻进, 角度 -39° , 斜深 30 m。2, 3 号钻孔为一对平行双孔, 间距 2 m。7 号钻孔位于开切眼 50 m 处, 沿煤层底板向下倾斜钻进, 角度 -30° , 斜深 34 m。7, 8 号钻孔为一对平行双孔, 间距 2 m。孔径均为 73 mm。

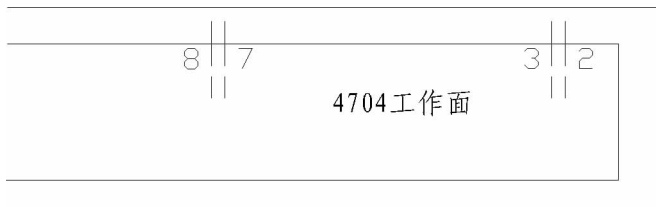


图 1 4704 工作面声波钻孔布置示意图

Fig. 1 Sketch of the acoustic drilling arrangement on 4707 working face

在 2 号孔放置发射换能器, 在 3 号孔放置接受换能器。根据声波在孔间岩体中传播的时间和孔间距离

计算不同深度的声波速度。测量时,发射、接受换能器在两孔内保持等深度同步移动。测量从开始回采至推过 3 号孔后 40 m,共观测 17 次。在工作面推至距 7 号孔 20 m 时开始观测,至推过 8 号孔后 20 m 停止,共观测 11 次。观测数据如图 2,图 3 所示。

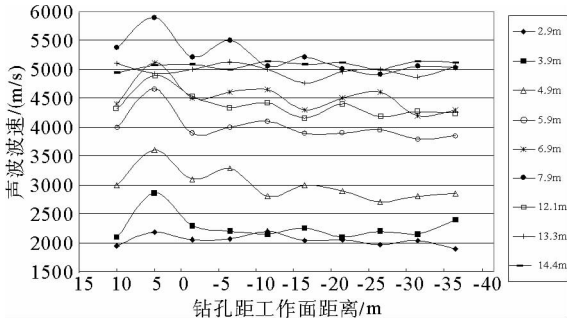


图 2 2 号,3 号孔不同深度声波波速与采动关系图

Fig. 2 The 2,3 drilling's variation curves of wave velocities along with the advance of the working face

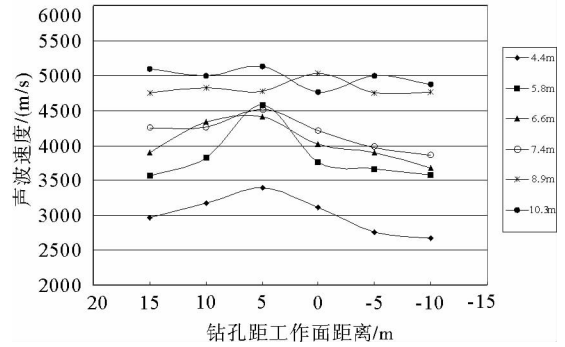


图 3 7 号,8 号孔不同深度声波波速与采动关系图

Fig. 3 The 7,8 drilling's variation curves of wave velocities along with the advance of the working face

2.3 资料解释

由 2,3 双孔和 7,8 双孔的不同深度声波波速与采动关系图可以发现,在垂深 3 m 以内的声波波速曲线波动较小,说明在 3 m 以内的声波波速在采动过程中基本稳定,这是由于斜孔垂深 3 m 以内的范围位于采面以外,受采动影响小,破坏甚微。

垂深 3.9~12.1 m 之间的声速曲线出现较大的波动,在钻孔距工作面距离 15~5 m 时声波波速迅速升高,在 6~5 m 处达到最大值,工作面推过钻孔后,波速不断降低。这是由于钻孔在距工作面 15~5 m 时,钻孔处于工作面前方支承压力上升区距 5 m 左右处达到压力峰值,在支承压力影响下底板处于压缩状态形成压缩区,声波的波速上升。在工作面推过后,压缩区的岩体卸压形成膨胀区,在压缩区和膨胀区之间形成剪切带,波速降低。这种变化规律正是底板受到采动破坏的特征,由此可以判断 3.9~12.1 m 的区域为采动破坏区。垂深 13 m 以上,声波曲线趋于稳定,说明已不在破坏范围内。

由上分析可推断此面由采动引起的最大破坏深度为 12.1 m。

3 数值模拟

3.1 建立网格模型

为进一步研究底板采动破坏特征,采用 FLAC^{3D} 软件^[6-8] 进行数值模拟研究。如图 4 所示,设计模型走向 180 m,倾向 120 m,高度 54 m;划分为 96 000 个单元,103 275 个节点。

3.2 底板破坏过程模拟

在模型初始平衡之后,首次模拟开挖 40 m,然后以 10 m 为步距,开挖至 110 m,最后一步挖至 114 m。分别沿走向和倾向做塑性区切片图和位移切片图,如图 5—图 8 所示。最后利用编写的 fish 程序,显示出整个塑性区形态,并沿走向做剖面图(图 9)。

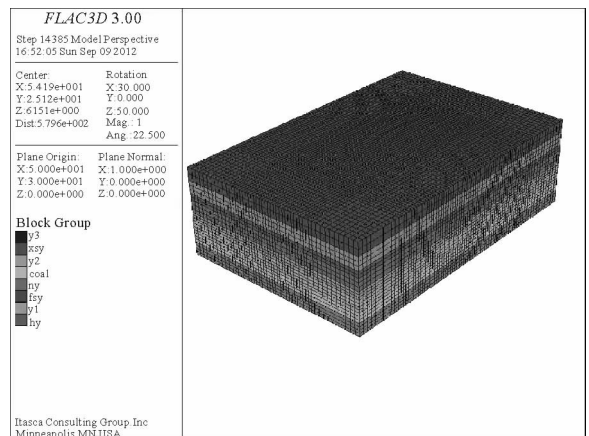


图 4 模型网格图

Fig. 4 The grid model

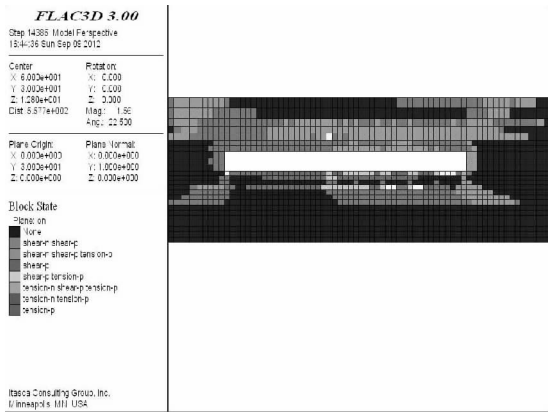


图 5 塑性破坏区走向切片图

Fig. 5 Slice of plastic failure zone on advance direction

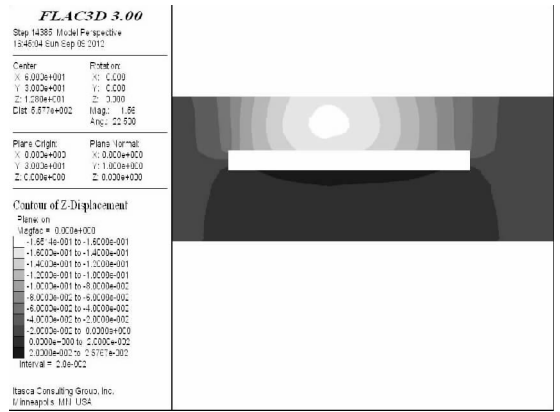


图 6 z 方向位移走向切片图

Fig. 6 Slice of z-directional displacement on advance direction

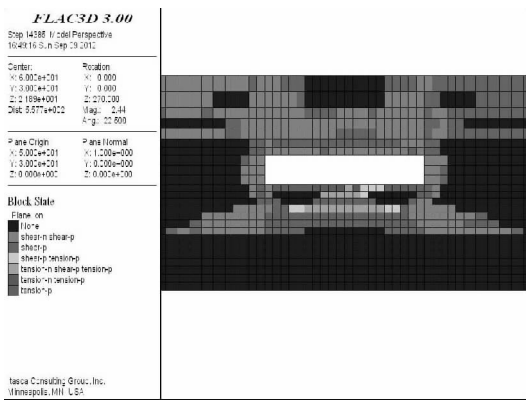


图 7 塑性破坏区倾向切片图

Fig. 7 Slice of plastic failure zone in inclinational direction

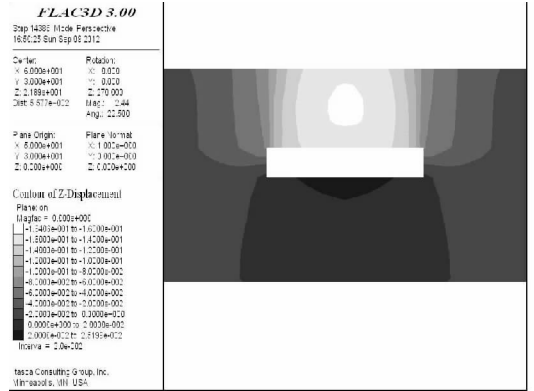


图 8 x 方向位移走向切片图

Fig. 8 Slice of x-directional displacement in advance direction

3.3 底板破坏区特征分析

3.3.1 破坏过程

采动底板破坏是由于底板应力受开采影响不断集中和释放,在推进方向上底板经历压缩、膨胀再压缩的过程。煤壁应力集中处底板形成压缩区,采空区底板形成膨胀区。在压缩区和膨胀区形成剪切带。随着工作面不断前移,剪切带也不断移动,在底板形成破坏区。工作面前方及两侧和切眼处煤层底板出现剪切破坏,采空区中部底板出现拉伸破坏。

3.3.2 破坏范围形态

从塑性区切片图可以看到整个采动塑性破坏区沿采空区分别向上下呈喇叭状分布。底板破坏区,沿采空区四周和底板向下扩散呈现出喇叭形,破坏范围上小下大。

3.3.3 破坏深度

最大破坏深度发生在工作面上隅角和下隅角处的底板,破坏深度达 12.5 m,并向两侧水平延伸,最大可延伸至 16 m。最小位置在采空区中部位置深度 8.75 m。模拟结果表明,最大破坏深度为 12.1 m 与声波探测的结果一致。

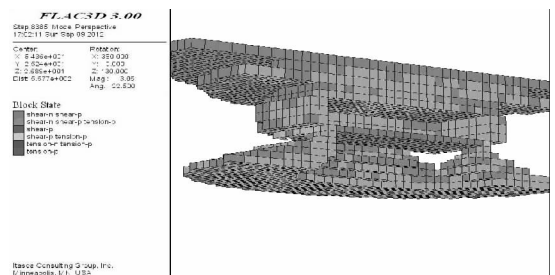


图 9 塑性破坏区剖面图

Fig. 9 The section of plastic failure zone

4 结论

1) 钻孔声波法由于钻孔位置固定不变, 所以不能全方位地反映底板破坏情况。应用 FLAC^{3D} 数值模拟计算, 可以模拟出完整的底板破坏形态。两种方法相互验证, 相互补充。声波法探测的 4707 工作面最大破坏深度为 12.1 m, FLAC^{3D} 的模拟结果显示最大破坏深度为 12.5 m, 最终确定 4707 工作面的最大破坏深度为 12.5 m。

2) 工作面底板的破坏过程是先压缩、后膨胀、再压缩, 整个底板破坏的形态沿采空区四周和底板向下扩散呈现出喇叭状。在工作面两端的底板破坏深度最大, 采空区中部底板破坏深度最小。

3) 实测和数值模拟分析均显示初次来压的时间和位置声波异常最明显, 数值模拟也显示底板位移量最大, 此时底板的破坏程度也是最大。所以在初次来压的时间和位置最易发生突水。如果该位置存在断层, 并和承压水有水力联系将是极其危险的。在采前要详细查明该面的地质构造及水文条件, 编制安全计划。

参考文献

- [1] 于师建, 王玉和, 王渭明, 等. 岩体测试与探测[M]. 北京: 地震出版社, 2004: 98-101.
- [2] 张慎河, 彭苏萍, 刘玉香, 等. 含煤地层裂隙岩石声波速度特征试验研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2006, 25(1): 28-31.
ZHANG Shenhe, PENG Suping, LIU Yuxiang. Experimental study on properties of acoustic velocity in crack rocks of coal-bearing strata[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2006, 25(1): 28-31.
- [3] 刘传武, 张明, 赵武升. 用声波测试技术确定煤层开采后底板破坏深度[J]. 煤炭科技, 2003, 1(4): 4-5.
LIU Chuanwu, ZHANG Ming, ZHAO Wusheng. Destroying depth of coal seam floor's failure by sound wave technology[J]. Coal Science and Technology, 2003, 1(4): 4-5.
- [4] 关英斌, 李海梅, 路军臣. 显德汪煤矿 9 号煤层底板破坏规律的研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(2): 121-125.
GUAN Yingbin, LI Haimei, LU Junchen. Research of No. 9 coal seam floors fracture regularity in Xiandewang Coal Mine [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(2): 121-125.
- [5] 张平松, 吴基文, 刘盛东. 煤层采动底板破坏规律动态观测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 3010-3013.
Zhang Pingsong, Wu Jiwen, Liu Shengdong. Study on dynamic observation of coal seam floor's failure law[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3010-3013.
- [6] 孙向阳, 孟祥瑞, 赵光明, 等. 采面底板及煤壁破坏塑性区研究[J]. 煤炭科技, 2009, 3(3): 10-12.
SUN Xiangyang, Meng Xiangrui, ZHAO Guangming, et al. Research on analysis method of backplane destroys under working surface with plastic theory[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2009, 3(3): 10-12.
- [7] 鲁海峰. 承压水上采煤底板变形破坏特征数值模拟研究及其工程应用[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2008: 23-49.
- [8] 白国良. 基于 FLAC^{3D} 的采动岩体等效连续介质流固耦合模型及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 106-110.
BAI Guoliang. Fluid-solid coupling model of equivalent continuous medium in overburden rock based on FLAC^{3D} and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 106-110.