

微震初至波在岩层中的传播路径研究

宋银林¹，王传朋^{2,3}，邓志刚^{2,3}，王元杰^{2,3}

(1. 大同煤矿集团有限责任公司，山西 大同 037003; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部，北京 100013;
3. 煤炭科学研究院 开采设计研究分院，北京 100013)

摘要：为了合理解释微震初至波在岩层中传播路径，提高微震监测系统的监测精度，从现场微震波传播异常现象出发，利用地震波基础理论，分别以微震初至波在单一岩层和过岩层分界面的传播方式及路径建立了模型，着重分析了过岩层分界面时，震源与拾震器位于同一岩层中以及位于不同岩层中微震初至波的传播路径。在此基础上，优化了微震监测系统拾震器的布置原则，通过现场校检，微震监测系统水平方向定位误差由优化前的37.5 m降到5.7 m，垂直方向定位误差由33.4 m降低到3.0 m，一定程度上解决了微震波传播异常现象。

关键词：微震波；初至波；冲击地压；传播路径

中图分类号：TD324 文献标志码：A 文章编号：0253-2336(2012)06-0015-04

Study on Spreading Route of Micro - Seismic Initial Arrival Wave in Rock Strata

SONG Yin-lin¹，WANG Chuan-peng^{2,3}，DENG Zhi-gang^{2,3}，WANG Yuan-jie^{2,3}

(1. Datong Coal Mine Group Corporation Ltd. , Datong 037003, China; 2. Mining and Design Department, Tiandi Science and Technology Company Ltd. , Beijing 100013, China; 3. Mining and Design Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to rationally explain the spreading route of the micro - seismic initial arrival waves in the strata and to improve the monitoring and measuring accuracy of the micro - seismic monitoring and measuring system, from the abnormal phenomena of the site micro - seismic spreading, with the basis theory of the seismic wave, a model was established individually with the spreading way and route of the seismic initial wave in a single rock stratum and the interface of the passed rock strata. The analysis on the spreading route of the micro - seismic initial arrival wave when the seismic sources and the seismic collector in a same rock stratum or not in a same stratum as the initial wave passing the interface of the rock strata. Based on the circumstances, the seismic collector layout principle of the micro - seismic monitoring and measuring system was optimized. With the site correction, the horizontal directional position error of the micro - seismic monitoring and measuring system could be reduced from 37.5 m before optimized to 5.7 m and the vertical directional position error could be reduced from 33.4 m to 3.0 m. thus the abnormal phenomena of the micro - seismic spreading was solved in certain degree.

Key words: micro - seismic; initial arrival wave; mine pressure bumping; spreading route

随着煤矿井工开采强度的不断增加，以冲击地压为代表的矿山压力显现日趋剧烈。加强对局部区域冲击地压的实时监测，进行危险等级评价、指导现场措施的制定及施工，是目前急需解决的问题^[1-2]。微震监测技术凭借其实时、精度高、操作简单等优势，在煤矿冲击地压、顶板大面积来压、煤与瓦斯突出等矿山压力显现强烈的事故监测中起到了越来越重要的作用^[3]。同时，研究人员也逐

步认识到，由于煤矿地质条件较为复杂，决定了微震波在岩层中的传播路径具有不确定性，导致微震波到达拾震器的初至时间这一重要参数的精确性降低。笔者主要分析微震初至波在煤矿岩层中的传播路径，为井下拾震器的合理布置提供必要的依据。

1 矿井概况

某矿4603工作面采深600 m，煤层倾角9~

收稿日期：2011-12-11；责任编辑：曾康生

基金项目：国家重点基础研究发展计划（973计划）资助项目（2010CB226806）

作者简介：宋银林（1968—），男，山西广灵人，高级工程师。Tel: 0352-7868266, E-mail: tmjtsyl@163.com

网络出版时间：2012-06-15 10:27:00；网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120615.1027.201206.15_034.html

引用格式：宋银林，王传朋，邓志刚，等. 微震初至波在岩层中的传播路径研究 [J]. 煤炭科学技术，2012, 40 (6): 15-18.

11°，为复合煤层：上分层煤厚平均2.18 m，下分层煤厚平均0.33 m，中间夹矸为0.15 m的细砂岩。直接顶为0.70 m细砂岩，无层理，结构完整，基本顶为8.10 m细砂岩，坚硬、结构完整，直接底为8.10 m的细砂岩，波状炭质条纹完整；顶底板砂岩普氏系数8~16，采煤方法为综合机械化采煤。该工作面自2009年5月2日第1次发生冲击地压以来，已经连续发生多次强烈的矿压显现，几乎每次都造成几十米甚至近百米巷道垮塌，严重影响了生产。为研究该工作面导致冲击地压的直接原因，并对冲击地压实时在线监测，该矿于2010年引进波兰ARAMIS M/E微震监测系统。系统运行后，发现一个异常现象：距离校检炮较远的拾震器比较近的拾震器先接收到放炮波形。如图1所示，N点为微震系统定位校检炮位置，M点为校检炮实际位置。

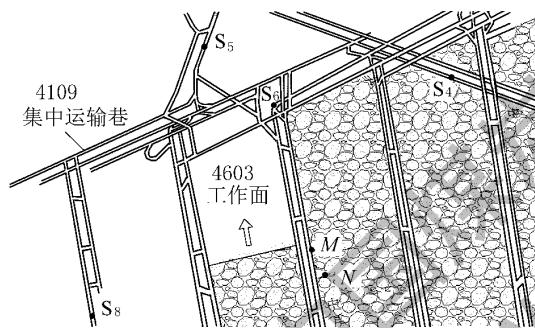


图1 拾震器布置及校检炮定位示意

图2为各拾震器接收到校检炮的波形图，图2中左侧竖线标注为微震初至波到达各拾震器的时间，由图可知：S₈拾震器首先接收到放炮事件，其次分别为S₅、S₄及S₆，但是从拾震器空间布置上看，距离校检炮最近的拾震器为S₆，由微震定位理论得知，S₆应该较其他拾震器先接收到放炮信号。经计算，校检炮水平方向定位误差为37.5 m，垂直方向定位误差33.4 m，误差均超出了系统常规值（水平方向±10 m，垂直方向20 m）。初步

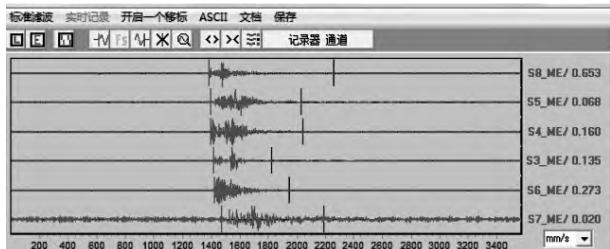


图2 校检炮事件的微震波

估计由于不同层位岩层物理力学性质不同及拾震器位置布置不合理，导致微震波在岩层中的传播路径偏离假定的直线传播太远而引起的计算误差。

2 微震初至波在岩层中传播路径分析

2.1 微震波特性

微震波按传播速度分不同的2种波：纵波和横波。前者质点振动的方向与波传播的方向一致，后者质点振动的方向与波传播的方向垂直。煤矿微震波多是由于矿山采动影响区域应力集中达到一定极限后释放引起的，纵波成分居多，波速大，多为拾震器接收到的初至波，因此在目前的微震监测技术大多利用纵波。在实际地下介质中，不同岩性的弹性性质不同，形成各种不同的弹性分界面。微震波传播时遇到各种不同的弹性分界面，将产生反射、折射以及局限于沿界面传播的面波。为了使得研究具有一般性，假设所研究的每一独立岩层为均质、各向同性的单相介质。

2.2 微震初至波在单一岩层中的传播

微震波是由震源激发，进而向四周以球面形式扩展。图3为微震波在单一岩层中的传播路径平面示意。微震波在传播过程中，任何时刻波前面上的每一点都可以看作是一个新的点源，由它产生二次扰动，形成元波前，之后新波前的位置可以认为是该时刻各元波前的包络，由波前面各点所形成的新扰动（二次扰动）在B处拾震器相互干涉叠加，其叠加结果为观测到的总扰动。

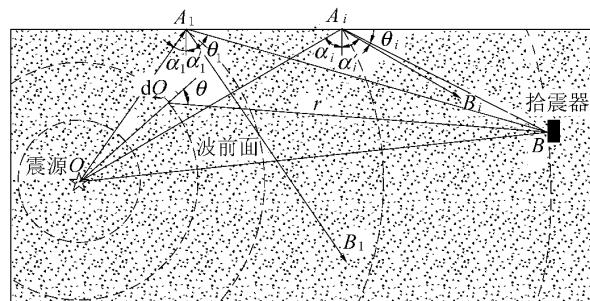


图3 单一岩层中微震初至波的传播路径平面示意

如图3所示，假设由震源O发出的任意时刻的波前面位置，半径为r₀，波前面上的任意面元用dQ表示，拾震器所在B点到dQ的距离用r表示，且θ是dQ法线与r的夹角，点A₁、A₂、…、A_i为微震波在岩层界面的入射点，且α为入射角，α'为反射角。如果由震源O点发出的微震波振幅为A。

根据惠更斯-菲涅尔原理, 可以计算出整个波面 Q 在拾震器所在 B 点形成的总扰动 u_B 为

$$u_B = A \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \iint_Q \frac{e^{-jkr}}{r} k(\theta) dQ$$

其中, $k(\theta)$ 为倾斜因子。若 λ 为微震波长, j 为虚数单位, 则 $k(\theta) = j(1 + \cos \theta) / (2\lambda)$ 。

微震波在岩体中传播满足费马定律^[5]: 在同一岩层中, 微震波的传播速度相同, 在不同的传播路径中, 沿射线传播的旅行时间和沿任何其他路径传播的时间相比最小。如图 3 所示, 在 B 处拾震器接收到微震初至波的传播路径是由震源 O 点沿直线传播到拾震器, 当拾震器接收到微震初至波的同时, 其他路径的微震波经由地表反射后传播至图 3 中 B_1, B_2, \dots, B_i , (其中 $OA_1 + A_1B_1 = \dots = OA_i + A_iB_i = OB$)。因此, 微震波在单一岩层中传播时, 不经过地表反射, 沿震源射线传播至拾震器的路径是时间最短路径, 即微震初至波传播路径。

2.3 微震初至波过岩层分界面的传播

在煤矿冲击地压微震监测中, 各岩层呈层状产状, 多数情况下微震波需穿层传播。设微震波在 2 个不同岩层中的传播速度分别为 V_1, V_2 。

微震波由震源激发, 传播至岩层分界面时, 根据斯奈尔定理: 当弹性波遇到 2 种不同均匀介质之间的分界面时, 即遇到具有弹性突变的弹性分界面时, 弹性波要在此分界面上产生反射和折射, 入射波、反射波和折射波之间的关系, 如图 4 所示。

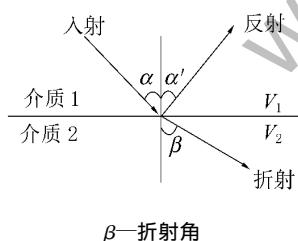


图 4 入射波、反射波和折射波之间的关系

则有: $\sin \alpha / V_1 = \sin \alpha' / V_1 = \sin \beta / V_2 = p$ (p 称射线参数)。即: 入射角等于反射角, 折射角的大小决定于 2 介质的速度之比, 且同一界面上入射波、反射波和折射波具有相同的射线参数 p 。

根据震源与拾震器布置方案不同, 微震波在岩层分界面的传播有以下 2 种情况。

2.3.1 震源与拾震器在同一岩层

1) 当 $V_1 > V_2$ 及当 $V_1 < V_2$ 且满足 $(A_1A_{1i}/V_2) \geq (C_1C_{1i}/V_1)$ 时, $(OA_1 = OC_1, BA_{1i} = BC_{1i})$, 按

照费马定律, 微震波类似其在单层介质中的传播, 根据前面研究, 路径 OB 是微震初至波的传播路径。

2) 当 $V_1 < V_2$ 时, 且满足 $(A_1A_{1i}/V_2) < (C_1C_{1i}/V_1)$, $(OA_1 = OC_1, BA_{1i} = BC_{1i})$, 则存在一入射角 α_1 , 使得微震波以 A_1 为入射点, 从速度为 V_1 的岩层入射到速度为 V_2 的岩层, 并在两岩层界面发生折射, 微震波以 A_1 点为新的扰动, β_1 为折射角, 在下部岩层中传播, 并在 A_{1i} 点入射到速度为 V_1 的岩层, 到达处拾震器, 之后整个波形产生的扰动在拾震器 B 点叠加, 形成总扰动, 如图 5 所示。此种情况下, 由于传播路径较长, 微震波能量衰减相对较大。

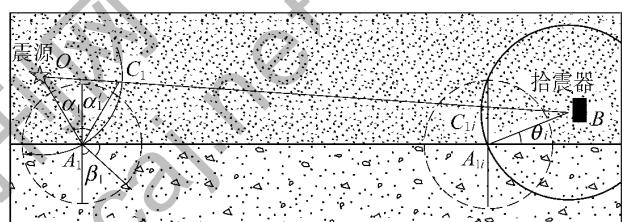


图 5 震源与拾震器在同一岩层中的传播路径

2.3.2 震源与拾震器不在同一岩层

在震源与拾震器分布在不同岩层时, 微震波将穿过岩层界面, 初至波及之后扰动共同在拾震器 B 点叠加, 形成总扰动, 如图 6 所示。假设微震波在速度为 V_1 的岩层中传播路径为 OA_1 , 在下部速度为 V_2 的岩层中传播路径为 A_1B , 则微震波自震源 O 传播到拾震器 B 的时间 $t = OA_1/V_1 + A_1B/V_2$ 。①当 $V_1 < V_2$ 时, 微震初至波的 OA_1 路径将较小, 此种情况下, 微震初至波的传播路径为图 6 中左侧 OA_1B 。②当 $V_1 > V_2$ 时, 微震初至波的 OA_1 路径将较大, 此种情况下, 微震初至波的传播路径为图 6 中右侧 OA_iB 。

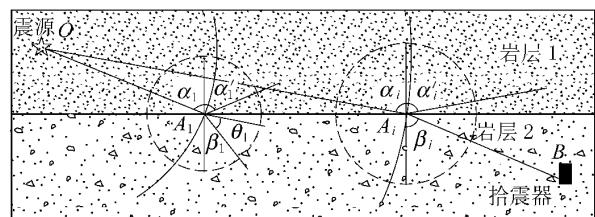


图 6 震源与拾震器在不同岩层的传播路径

按照惠更斯-菲涅尔定理, 微震波经两岩层分解面的反射及折射后, 在拾震器 B 点形成总扰动。

2.4 微震监测系统拾震器布置原则优化

微震监测系统拾震器布置在干燥、相对安静、非瓦斯积聚区等基本要求基础上,为增强微震监测系统的可靠性,降低误差,根据上述微震初至波在岩层中传播路径的分析,拾震器布置在矿区应该遵循以下4条原则:①为了使微震波传播路径尽可能地直接,避开多层界面反射、折射造成能量的损耗,尽量将拾震器布置在坚硬岩层中;②靠近采动区域布置拾震器时,要将拾震器布置在距离冲击区域较近,且坚硬的顶板或底板岩层中;③由于井下条件复杂,当出现避不开煤层布置的情况下,尽量靠近煤层顶底板较坚硬者布置;④一般微震波长分布在30~1 000 m,如果存在巨厚煤层顶板或底板冲击的情况,不应将拾震器布置在煤层顶板以下或底板以上。

3 工程应用

在上述某矿4603工作面采动影响范围内,微震事件常发生在煤层上方30 m处,8.1 m厚的细砂岩中,而拾震器S₆布置在厚的底煤上,且周围是煤巷,微震波在底煤及周围煤巷破碎圈内的传播速度远小于其在坚硬顶底板中的传播速度。因此,按照拾震器布置原则,重新制定了S₆的安装位置,将其布置在工作面上方坚硬的细砂岩底板中。调整S₆拾震器后,S₄仍然较S₆先接收到放炮信号,但是S₄、S₆拾震器接收校检炮初至波的时间与其所处的空间位置相符,异常现象不明显。经校检炮定位实验,此种拾震器布置方案,水平定位误差5.7 m,垂直方向定位误差3 m,符合微震监测系统定位精度要求,满足现场需要,为该回采工作面冲击地压的实时、在线监测冲击危险等级评价提供了可靠的数据资料。

4 结语

采用地震波传播理论分析研究了微震初至波在煤岩体中的传播路径,并建立了相关传播模型,在此基础上优化了微震监测系统拾震器的布置原则。通过现场实际应用,研究成果能够较好地解决微震波传播路径的异常现象,降低微震监测系统定位误差,为后续煤矿冲击地压微震监测拾震器的优化布置提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 邓志刚,任勇,王传朋,等.微震、地音数据综合分析法初探[J].煤矿开采,2010,15(1):18~20.
- [2] 姜福兴,宋广东,孔令海,等.微地震波在煤矿岩层中的传播特征研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):91~96.
- [3] 夏永学,潘俊锋,王元杰,等.基于高精度微震监测的煤岩破裂与应力分布特征研究[J].煤炭学报,2011,36(2):65~69.
- [4] 姜福兴,王存文,杨淑华,等.冲击地压及煤与瓦斯突出和透水的微震监测技术[J].煤炭科学技术,2007,36(1):26~29.
- [5] 姚姚.地震波场与地震勘探[M].北京:地质出版社,2006:35~36.
- [6] 牛滨华,孙春岩.地震波理论研究进展:介质模型与地震波传播[J].地球物理学进展,2004,19(2):255~263.
- [7] 齐庆新,陈尚本,王怀新,等.冲击地压、岩爆、矿震的关系及其数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):90~96.
- [8] 任勇.华丰煤矿微震监测与冲击地压影响因素分析[J].煤炭科学技术,2010,38(7):1~6.
- [9] 张宗文,安伯义,刘金亮,等.千米深井强冲击倾向煤层的冲击地压防治技术[J].煤炭科学技术,2010,38(7):17~20.
- [10] 苗素军,牟宗龙,窦林名,等.深部复杂地质条件下矿井冲击地压分析及防治[J].煤炭科学技术,2010,38(9):43~46.

(上接第14页)

参考文献:

- [1] 余孝民.浅析锚杆支护在大断面开切眼施工中的应用[J].煤炭科学技术,2006,34(6):26~28.
- [2] 马允刚,王海龙,麻开辉.厚煤层综采一次采全高大跨度开切眼施工技术[J].煤炭科学技术,2007,35(5):36~38.
- [3] 李希勇,张秀峰.高强度预应力注浆锚索研制与应用[J].煤矿开采,2008,13(3):48~49.
- [4] 靳洪文,段晨辉,曲天智,等.高强锚杆支护系统抗撕裂钢带的研究[J].煤炭科学技术,2003,31(12):16~19.
- [5] 李秀华.“三软”煤层中炮采改为轻放开采的开切眼支护实践[J].煤炭科学技术,2003,31(11):46~47.
- [6] 郑复伟.大断面综采开切眼联合支护技术[J].煤炭技术,2007,26(8):26~27.
- [7] 易先春,沈五名.大采深综采开切眼全锚支护技术[J].煤炭科学技术,2003,31(4):28~29.
- [8] 赵健,李焕斌.崔家寨矿锚索支护技术的应用[J].煤炭科学技术,2006,34(10):17~19.
- [9] 胡平.应用锚索支护开切眼的探索[J].煤矿开采,2006,11(1):46~47.
- [10] 何满潮,孙晓明,苏永华,等.综放工作面大断面开切眼锚网索支护技术研究[J].煤炭科学技术,2002,30(1):36~39.