

# 应力波在闭合结构面传播过程的波形特性

王观石<sup>1,2</sup>, 胡世丽<sup>1</sup>, 李世海<sup>3</sup>

(1. 江西理工大学, 江西 赣州市 341000; 2. 北京科技大学, 北京 10083;  
3. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

**摘要:**通过试验,研究了应力波在闭合结构面的传播过程。研究发现,闭合结构面不仅会影响应力波传播速度,而且还对应力波波形有重要影响;透射波能够有效反映应力波在结构面的传播过程,不同分段的透射波形反映了不同的信息。这为利用应力波探测岩体结构面特性提出了新思路。

**关键词:**岩体;闭合结构面;应力波;波形特性

**中图分类号:** TU457 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1005 - 2763 (2008) 06 - 0034 - 04

## Waveform Characteristics of Stress Wave During Propagating in a Closed Structural Plane

Wang Guanshi<sup>1,2</sup>, Hu Shili<sup>1</sup>, Li Shihai<sup>3</sup>

(1. Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 2. University of Science and Technology Beijing, Beijing, 10083, China; 3. Institute of Mechanics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** By experiment, the propagating process of stress wave in a closed structural plane was studied, and it was found that closed structural plane not only influenced the propagating speed of stress wave but also had significant effect on its waveform, the transmission wave could reflect the propagating process of the stress wave effectually, and its different section could reflect different information. These conclusions provide a new thought for exploring the characteristics of structural plane of rock mass using stress wave

**Key Words:** Rock mass, Closed structural plane, Stress wave, Characteristics of waveform

研究岩体结构的方法主要有地质调查和物理探测,而爆破地震探测是最主要的物理探测方法,也是最重要的探测法。爆破地震探测法是利用爆破产生地震波,根据地震波的传播特性,通过对被测点振动信号的振幅、频率、波形等特性进行分析来确定岩体结构的一种方法。目前对爆破地震探测法的研究主要集中在对地震波的波速、振幅、频率和衰减等方

面<sup>[1~5]</sup>,对波形的研究相对较少,特别是对波形中的子波信息研究不多。本文在分析入射波和透射波传播过程的基础上,通过试验研究发现透射波波形能够有效地反映入射波的某些重要信息,进而可以反映入射波载体的某些信息,为利用应力波探测岩体结构提出了一种新思路。

## 1 应力波在闭合结构面的传播过程

为使问题简化,把应力波的传播简化为一维问题,且不考虑应力波的透射时间,只考虑应力波的传播时间。如图 1 所示,有 A、B 两个试块,为相同材料,A 试块的长度为  $2L$ ,B 试块的长度为  $L$ ,试块间有一条结构面,结构面的厚度为  $L$ ,在 B 试块的右端为可控爆源,即 B 试块的应力波为入射波,A 试块的应力波为透射波。



图 1 应力波传播模型

$t=0$ 时,在 B 试块的右端面受到可控爆源产生的应力波作用,设应力波经过  $T$  时间从 B 试块的右端面传到左端面 ( $T = \frac{L}{c}$ ,其中  $L$  为试块长度, $c$  为波速)。  $t=0 \sim T$  内,A 试块中没有应力波。  $t=T$  时,应力波传播至 B 试块的左端面,并在左端面产生一定变形  $l$ 。若  $l < L$ ,则应力波在结构面处不发生透射,这样应力波只在 B 试块内部传播;若  $l > L$ ,则应力波在结构面处会发生透射。为便于说明应力波透射过程,分两种情况来说明:第一种情况是只发生一次透射,发生这种情况的条件是  $l$  较小或  $L$  较大,发生应力波透射(实质是两试块的碰撞)会消耗一定的能量,使得发生一次透射

收稿日期:2008 - 02 - 23

基金项目:国家自然科学基金重点项目(10632100)。

作者简介:王观石(1977 - ):男,江西于都人,讲师,博士研究生,从事爆破和岩体力学方面的研究,Email:wgsky010@126.com。

后就不能满足  $l > L$ , 即不再发生透射; 第二情况是发生一次透射后, 还能满足  $l > L$ , 这样就会发生多次透射, 显然  $l$  和  $L$  是影响透射次数的主要因素。第一种情况的波形较简单, 相当于应力波在两试块内部传播, 试块的振动信号的主频  $f$  满足  $c = 2lf^{1/2}$ , 其中,  $l$  为试块的长度。

如图 2 所示, 对于第二情况,  $t = T \sim 2T$  时, A 试块的应力波向左传播, B 试块的应力波向右传播。  $t = 2T$  时, A 试块的应力波向左传播至试块中部, B 试块的应力波向右传播至试块右端面。  $t = 2T \sim 3T$  时, A 试块的应力波继续向左传播, B 试块的应力波在右端面发生反射 (不考虑反射时间) 后向左传播。  $t = 3T$  时, A、B 试块的应力波都传播至各自的左端面, 此时有可能发生第 2 次透射, 根据两试块的变形特点可以判断这次透射强度相对较小。  $t = 3T \sim 4T$  时, A、B 试块的应力波都在各自的左端面发生反射后向右传播。  $t = 4T$  时, A 试块的应力波向右传播至试块中部, B 试块的应力波向右传播至试块右端面。  $t = 4T \sim 5T$  时, A 试块的应力波继续向右传播, B 试块的应力波在右端面发生反射后向左传播。  $t = 5T$  时, A 试块的应力波向右传播至试块右端面, B 试块的应力波向左传播至试块左端面, 此时将发生第 3 次透射, 试块的变形可使这次透射强度相对前两次都要大, 反映在波形上升幅度大。

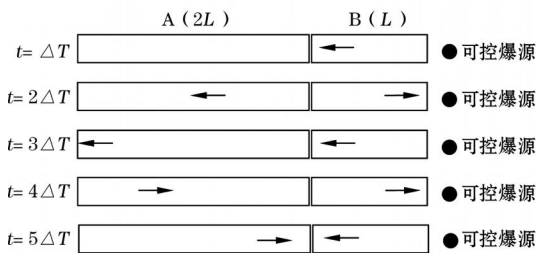


图 2 应力波传播过程

上述是应力波在 1 周期内的透射过程。在 A 试块长度是 B 试块长度的两倍的条件下, 1 周期内应力波可能发生 3 次透射, 随着试块长度比例不同, 1 周期内应力波透射次数也会改变, 比如 A、B 长度相同, 1 周期内透射次数就应该是 2 次。透射次数不同, 透射波形也不一样。根据上述应力波传播过程及试块变形特点可以看出, 应力波第 1 次透射和第 3 次透射强度较大, 反映在波形上就是波形上升幅度较大。显然透射次数越多, 波形突变次数也越多, 波形变得更复杂。

## 2 试验方法

试验试块是现浇混凝土, 混凝土的质量配比是: 沙 水泥 水 = 3 1 0.5, 长混凝土试块的几何尺寸是: 长  $\times$  宽  $\times$  高 = 4 m  $\times$  0.4 m  $\times$  0.4 m, 短混凝土试块的几何尺寸是: 长  $\times$  宽  $\times$  高 = 2 m  $\times$  0.4 m  $\times$  0.4 m。先浇好长试块, 两周后再浇短试块, 试块养护 28 d 后进行试验。试验前用波速仪测得完整混凝土的波速, 再在两试块的连接界面下方挖一条防震沟, 在防震沟里用千斤顶加载使连接界面发生剪切破坏, 构造出一条闭合结构面, 然后在结构面的两侧布好加速度传感器, 并和采集系统连接。试验用的可控爆源由铁笼子和塑料袋组成, 铁笼子几何尺寸是: 长  $\times$  宽  $\times$  高 = 0.4 m  $\times$  0.4 m  $\times$  0.4 m, 试验时先将塑料袋放在铁笼子里, 然后往塑料袋里充满水, 把炸药放在铁笼子的中心处。塑料袋的作用是装水, 另外由于它容易被破坏, 可以保护铁笼子不被爆炸波冲击破坏。炸药为 10 g 乳化药, 用电雷管起爆。

振动采集系统包括工控机、调理模板、加速度传感器。调理模板采用 CM4016 多功能信号调理模块, 它有 16 个通道, 既可以放大振动信号, 又可以滤波, 传感器采用 LC01 系列压电三向加速度传感器, 并且自身带有电荷放大器, 传感器的灵敏度为 205 mV/g, 频响范围为 0.5 ~ 4000 Hz ( $\pm 10\%$ ), 量程为 25 g。试验的采样频率为 10000 Hz。

## 3 试验数据及分析

### 3.1 试验数据

B 试块的质点振动 (轴向) 加速度曲线如图 3 所示, A 试块的质点振动 (轴向) 加速度曲线如图 4 所示。测得完整混凝土的波速是 3950 m/s。

### 3.2 试验数据分析

#### 3.2.1 结构面的波速分析

应力波传播速度和质点振动速度是两个不同的物理量, 但又是密切相关的, 应力波传播是由质点振动来实现的, 应力波在结构面的传播速度实质上就是质点的振动速度。试验获得了质点加速度曲线, 对加速度曲线进行两次积分便可得到质点位移曲线, B 试块的质点的位移曲线如图 5 所示。位移曲线上最大值为  $1.77 \times 10^{-5} \text{ v} \cdot \text{s}^2$ , 发生该位移的时间为 7.8 ms, 根据传感器的灵敏度计算得位移值为  $8.63 \times 10^{-5} \text{ m}$ , 求得平均速度为 1.1 cm/s。与完整混凝土的波速相比, 质点振动速度比完整混凝土波

减小 5 个数量级。虽然结构面厚度非常小,但由于质点振动速度太小,结构面大大地降低了应力波传播速度,因此应力波在岩体中的传播速度可以有效地反映岩体的完整性。同时可知,结构面间距越小,波速反映结构面的有效性越低,当结构面间距在某一范围内时,波速就可能不反映结构面。质点振动速度与波速相差 5 个数量级并不矛盾,原因就在于分子间距一般为  $10^{-9} \sim 10^{-10}$  m,比结构面厚度小 5 数量级。

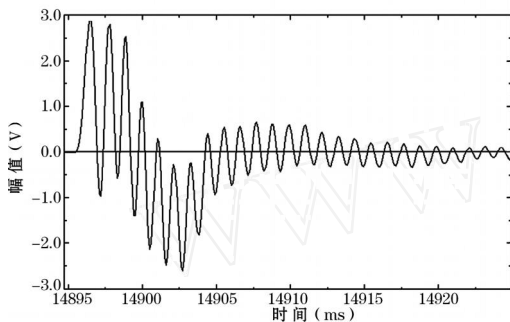


图 3 B 试块振动加速度曲线

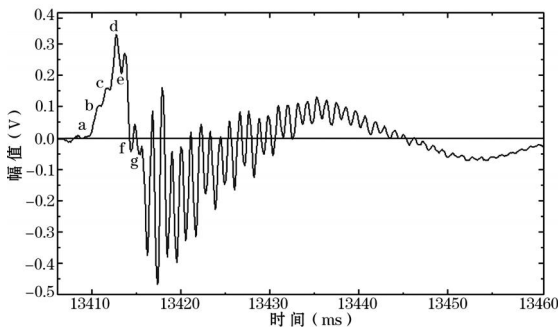


图 4 A 试块振动加速度曲线

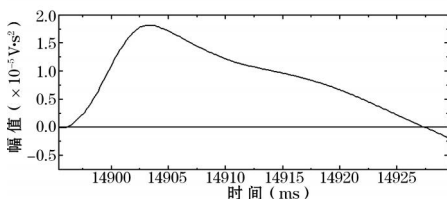


图 5 B 块质点位移曲线

### 3.2.2 波形分析

A 试块的应力波是透射波,从图 4 的波形上看,首波(第一个波峰)持续时间长,约为 6.1 ms,其中上升时间是 3.2 ms,下降时间是 2.9 ms,共发生 6 突变,形成 6 个子波,各子波峰间的时间差约为 1 ms。按试验获得的波速  $c = 3950$  m/s 可计算应力波从 B 试块的一端传到左另一端的时间  $T = 0.5$  ms,而小波峰之间的时间差 1 ms 正好为  $T$  的 2 倍,即

应力波在 B 试块中一个来回的时间,这说明首波中的子波所对应的频率能够有效地反映入射波,而入射波频率又反映了入射波载体的几何尺寸,因此透射波首波子波能够有效地反映入射波载体的几何尺寸,但是如果直接对透射波进行傅立叶变换,那么首波中的子波信息就会被隐盖。再结合应力波在结构面传播过程分析和透射波的首波波形,可以判断 A 试块在 1 个周期内发生了 3 次透射,从整个首波来看试块发生了 6 次透射,在 a 点是第 1 次透射,在 b 点是第 2 次透射,在 c 点是第 3 次透射。从波形上还可以看出,第 3 次透射使波形上升的幅度最大,第 1 次透射其次,第 2 次加载是这一周期内最小的。在 e、f、g 点的透射使波形上升幅度越来越小,说明透射的能量越来越少。从波形上看,首波之后,质点处于自由衰减振动状态,除了有一个明显的高频之外,还有一个明显的低频,该低频估计是地面振动频率,从整个波形来看,第 1 个波峰的信息最丰富,而且更便于分析。

B 试块的应力波是入射波,从图 3 所示的整个波形来看, B 试块是自由衰减振动。对于闭合结构面来说,应力波透射实质上就是两试块的碰撞,根据力的相互作用, B 试块的波形也应该有突变,而实际上却没有,其原因在于: A 试块首波的最大振幅是 0.33 V,而 B 试块的最大振幅是 2.95 V,两者相差一个数量级,这说明能量透射率非常低,因而可以认为透射对 B 试块来说就相当于自由衰减,因此从波形上并不能反映出来。

根据以上分析可以发现,透射波的首波波形能够有效地反映应力波在结构面处的透射情况和入射波载体的某些信息,而波形尾部的主要特征是自由衰减振动,入射波不能反映应力波在结构面处的透射情况。据此认为:在工程探测时,应根据探测目的对波形进行分析,如果是探测岩体的内部结构,应重点分析第 1 个波峰或前几个波峰;如果是探测被测点附近区域的结构时,应重点分析波形的尾部。

对图 3 进行傅立叶变换得到频谱图 6,从图 6 读出 B 试块质点振动的第 1 主频是 899 Hz,由公式  $c = 2lf$ ,可求得波速为 3596 m/s,这与用波速仪测得的波速比较接近,误差小于 10%。

## 4 结 论

虽然闭合结构面厚度小,但由于质点振动速度  
(下转第 60 页)

从而确定成庄矿电磁辐射敏感指标为电磁辐射最大值的平均值  $E_{\max-avg}$ 。

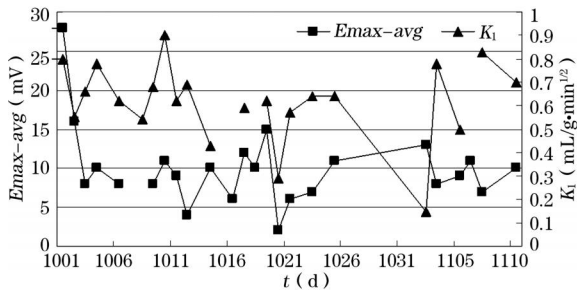


图 2 4215 巷左前方 10 - 11 月份  $E_{\max-avg}$  与  $K_1$  值对比

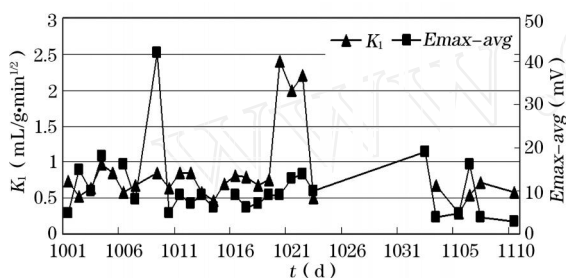


图 3 4220 巷正前方 10 - 11 月份  $E_{\max-avg}$  与  $K_1$  值对比

首先通过计算得出成庄矿常规预测的预测突出危险率,然后通过反推得出电磁辐射指标临界值,最后通过“三率”计算及评价,对临界值进行了修正,最后得出临界值为 10 mV,预测突出危险率为 25%。

预测突出危险准确率为 65%,预测无突出危险准确率为 100%。考虑到成庄矿动力现象较严重,在三率计算时,在确保预测无突出危险准确率 100%的情况下,适当提高了预测突出危险率。这样既保证了煤矿在掘进过程中的安全性,又使预测费用较低。

## 4 结论

分析了煤矿巷道掘进过程中接收的电磁辐射信号指标特征,简化了电磁辐射方法预测敏感指标的确定;给出了电磁辐射法预测煤与瓦斯突出的敏感指标及临界值的确定方法,并利用该方法对晋煤集团成庄矿的电磁辐射敏感指标及临界值进行了计算。该方法有利于电磁辐射预测煤与瓦斯突出技术在煤矿中的推广应用,可以提高煤矿突出危险预测的准确性。

### 参考文献:

- [1] 何学秋,等. 中国煤矿灾害防治理论与技术 [M]. 北京:中国矿业大学出版社,2006,(6):448~449.
- [2] 何学秋,刘明举. 含瓦斯煤岩破坏电磁动力学 [M]. 北京:中国矿业大学出版社,1995.
- [3] 王恩元,何学秋,聂百胜,等. 电磁辐射法预测煤与瓦斯突出原理 [J]. 中国矿业大学学报,2000,29(3):225~229.
- [4] 聂百胜,何学秋,王恩元,等. 用电磁辐射法非接触预测煤与瓦斯突出 [J]. 煤矿安全,2000,(2):41~43.

(上接第 36 页)

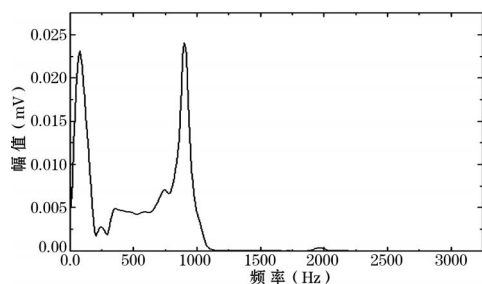


图 6 B 试块的频谱

也很小,结构面会降低应力波传播速度,因此应力波在岩体中的传播速度可以有效地反映岩体的完整性,但是当结构面厚度远小于质点振动位移时,岩体波速就有可能不能反映结构面及岩体的完整性。

试验研究表明,透射波的首波波形能够有效地反映应力波在结构面处的透射情况和入射波载体的几何尺寸,而波形尾部的主要特征是自由衰减振动,入射波的特征是自由衰减。因此,如果是探测岩体的内部结构,应重点分析透射波的第 1 个波形或前

几个波形;如果是探测被测点附近区域的结构时,应重点分析波形的尾部。但在某些特殊情况下,透射波的首波也会隐盖应力波的透射,比如反射波和透射波同时到达被测点,反射波被透射波抵消,使波形继续上升,没有表现出突变,即不出现子波。另外,如果两试块的间距很小,都会导致应力波透射次数增加,使波形变得更复杂。在实际问题中,由于受结构面形状、方位角、数量、岩块形状等因素的影响,使波形变得非常复杂。

### 参考文献:

- [1] 宁书年. 叠前 Kirchhoff 积分偏移法纵横波振幅比剖面的提取与应用 [J]. 中国矿业大学学报,2004,(9):495~498.
- [2] 王卫华. 不同应力波在张开节理处的能量传递规律 [J]. 中南大学学报(自然科学版),2006,(4):376~380.
- [3] 王卫华. 非线性法向变形节理对弹性纵波传播的影响 [J]. 岩石力学与工程学报,2006,(6):1218~1225.
- [4] 崔新社. 爆炸应力波在各向同性损伤岩石中的衰减规律研究 [J]. 爆炸与冲击,2001,(1):76~80.
- [5] 杨伟忠. 铜坑矿井下大爆破地震和冲击灾害的预防与控制 [J]. 矿业研究与开发,2006,(10):69~71.