

超声波在工程岩体检测中的应用

张晓春 李富全 金永君

(黑龙江矿业学院基础部 鸡西 158105)

在开掘巷道、地下开采等地下施工时,岩体中原来的应力平衡状态被破坏,应力将重新分布.重新分布后的应力一旦超过岩体的极限强度时,就使得巷道或开采工作面周围的岩体发生破坏,直至形成新的应力平衡.为了安全,有必要研究岩体的结构特征及应力的变化规律.岩体超声检测技术是近年来发展的一项新的检测技术,超声波在岩体内传播过程中,其波速、波形和频谱等参数的变化均与岩体结构及应力状态有着一定的对应关系.该技术是以岩体的力学特性为基础,研究超声波在岩体内传播规律,借以了解岩体的动弹性力学状态及其结构特征.随着岩体破碎程度增加、结构松软、应力降低,超声波波速相应地降低、振幅减小、波形变坏、频谱中主频向低频端移动.岩体超声检测技术主要有三种方法:波速法、波衰减法和波谱测试法.由于该技术能进行大面积的无损检测,因而得到人们的重视而被广泛采用.

一、波速法的原理及应用

波速法检测的物理基础是根据岩体弹性参量、应力状态、抗压强度等因素和波速的关系来检测岩体的性质.

物体的弹性与其内部结构有关.岩体内的超声纵波速度反应岩体拉伸和压缩形变;横波速度反应岩体的剪切形变;而纵、横波速比(V_p/V_s)表征岩体的完整程度.在各向同性岩石中测得纵横波速,可用下式求得岩体的弹性参量.

$$\text{动弹性模量 } E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}$$

$$\text{动泊松比 } \sigma_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

$$\begin{aligned} \text{动剪模量 } G &= \rho V_s^2 \\ \text{静弹性模量 } E_j &= 0.25 E_d^{1.3} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 ρ 为岩石密度.

岩体内应力与波速有着一定的对应关系,通过大量岩石试样单轴压应力作用下的实验观测,其关系如图 1 所示,但应力与波速之间的内在联系及物理机制,尚需进一步研究.

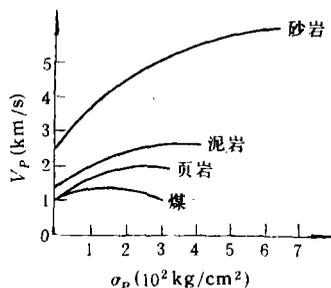


图 1 岩体内应力与波速关系曲线

岩体抗压强度由岩石试样的抗压强度及其结构面的性质决定,通过大量实验发现,岩石的抗压强度和波速之间大体上为一线性关系.

超声波在岩体内的传播速度与密度 ρ 的开方成反比,与弹性模量 E_d 的开方成正比.但动弹性模量受密度的影响更大,岩体的裂隙变小、其密度变大时,岩体的弹性模量急剧上升从而促使声速增大.最终波速随密度增大而增大,这已被许多实验证实.另外,岩体的湿度、岩性对波速影响也很大.

波速法检测的应用主要在以下方面:

1. 岩体弹性参量测试.利用超声检测技术,测得岩体中纵、横波速,可由公式(1)求得岩体弹性参量和动泊松比.

2. 岩体受力状态检测.利用图 1 的声速-应力关系曲线,再根据从岩体的钻孔中测得的不同深度的声速值,同岩样的声速-应力曲线上的声速比较,就能准确掌握岩体的应力分布

状态。

3. 岩层顶板裂隙检测. 如图 2 所示, 将发射探头与接收探头布置在一条穿过裂隙的测线上, 每隔一定距离布置一个测点, 测一次超声波传播时间, 绘制时距曲线. 在斜线折断处即为裂隙, 其深度为

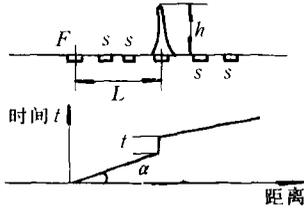


图 2 顶板裂隙检测

$$h = \frac{tctg\alpha(tctg\alpha + 2L)}{2(tctg\alpha + L)} \quad (2)$$

式中 L 为发射探头至裂隙的距离; t 为斜线折断处的时间间隔; α 为斜线倾角。

判断裂隙的方向, 是将发射探头固定不动, 移动裂隙另一侧接收探头, 若随着两探头间距离的增加, 传播时间反而减少, 则表明裂隙向探头移动方向倾斜, 反之则向发射探头方向倾斜。

4. 地下巷道、硐室围岩松动圈检测. 在岩体中开掘巷道后, 应力要重新分布, 围岩中产生应力升高和降低区, 形成松动圈. 超声波检测松动圈的原理是: 声波波速和波幅随着岩体裂隙增多、破碎程度增加和应力的降低而减小. 反之, 岩体完整、应力集中, 则波速和波幅增大. 只要测出波速和位置的关系曲线, 就可判断应力的集中与岩体的完整程度, 确定松弛圈范围. 为确定支护方案和进行最经济的支护选型提供科学依据. 测

量方法如图 3 左所示的两种方法, 图 3 右为某井巷工程的实测松动圈情况. 可见此井巷围岩松动圈范围在 0.2—0.6m 之间。

5. 矿井交岔点岩体工程检测. 矿井交岔点是矿井中使用范围广、使用时间长的工程. 交岔点处的岩体结构对交岔点工程的稳定起很重要的作用. 对岩体进行超声波检测, 就能很好地避免岩体内部的破碎带、裂隙带给工程造成的隐患. 这主要是检测不同测量线上的声速值, 如果某一测量线上声速值急剧下降则该测线附近岩体内就存在破碎带, 应及时采取支护措施。

二、波衰减法检测应力

通过大量的岩体声测实验, 我们发现对相同的岩石试样在相同的情况下加载, 波衰减的相对变化量要比波速大很多. 因此, 对测试应力而言, 波衰减就成了一个很好的参数。

通过对各向同性损耗介质、横观同性损耗介质、正交异性损耗介质的研究, 联立损耗介质的本构方程、质点应力场方程和质点波动方程, 分别建立了上述三类介质中的衰减系数与应力的关系. 对单轴压应力作用下的岩体, 其衰减系数比可近似地表示成所加应力 σ 的二次多项式的形式, 即

$$\alpha_{ii} / \alpha_{ii}^0 = 1 + A_1 \sigma_{ii} + A_2 \sigma_{ii}^2$$

式中 α_{ii} 为 σ_{ii} 应力状态时的衰减系数, α_{ii}^0 为零应力状态时的衰减系数, A_1 、 A_2 是与 σ_{ii} 平行方向的回归系数。

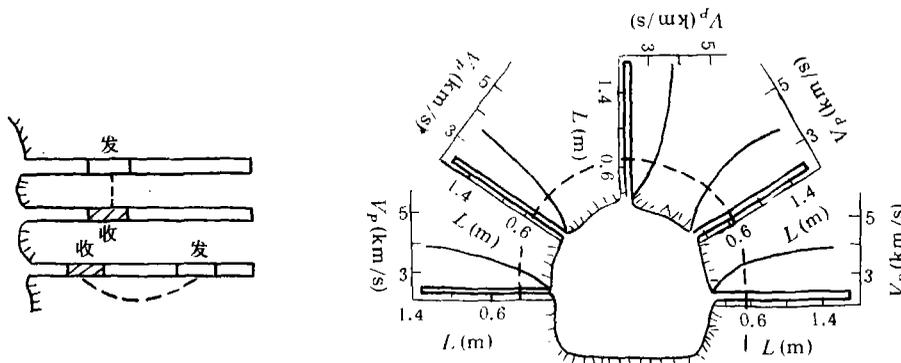


图 3 围岩松动圈检测方法及某井巷检测结果

波衰减法检测应力的实验系统如图 4 所示,其实验结果与理论基本吻合。

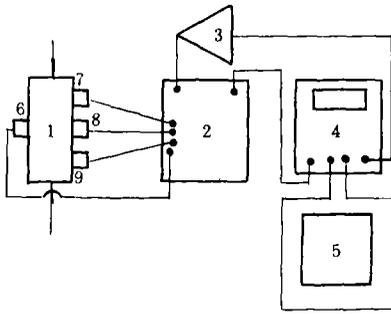


图 4 超声波衰减实验系统

1. 试件 2. 开关盒 3. 前置放大器
4. 声波分析仪 5. 记忆示波器 6. 发射探头 I
7. 发射探头 II 8. 接收探头 I 9. 接收探头 II

三、岩体超声波谱测试技术

通过岩体后的超声波检测信号,携带了大量反映岩体特性的各种信息。如果能很好地利用这些信息,对确定岩体的结构和状态是很有利的。以前人们大多注意波速这一特性参数,而对波形、频率和振幅则未充分利用。超声波谱测试技术是利用全波形,借助于快速傅里叶变换(FFT),将时域波形变为频域谱,在频域上研究被测岩体的特性,即频谱分析。

岩体超声波谱测试系统如图 5 所示。向岩石试件发射一窄脉冲,由于它在试件中传播的时间比其他(反射)波要短,因此有利于提高纵向分辨率及将直达波与后续波分开,避免界面反射影响提高信噪比。而且窄脉冲含有丰富的频率成分,比由方波调制的正弦波优越。因此采用窄脉冲发射、宽频带接收,可减小透射波失真。

透射波信号在进行 FFT 之前,应将信号离散、量化,即将模拟波形转换成数字序列。理论上采样时间间隔 $\Delta t = 1 / 2f_{\max}$,由于采样误差,高频混淆和时窗函数等影响, Δt 的选择由实际情况确定。如要真实反映 $f_{\max} = 1\text{MHz}$ 的岩体穿透波谱,应取 $\Delta t > 1 / 5f_{\max}$ 。量化后的数字波形要进行预处理,即纠零偏、消除系统零线偏差;进行叠加提高信噪比。为了获得有效信号的时频信息,通常对实测信号加窗分段进行短时窗傅里叶变换(SFFT),通过窗中心的平移,实现对信号的局部化分析。

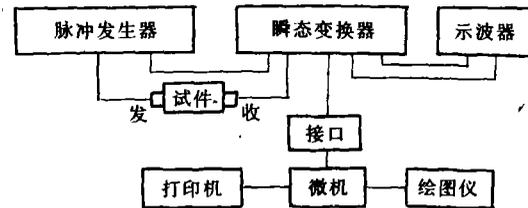


图 5 岩体超声波谱测试系统

通过大量岩石试样的频谱特性研究,我们得知,频谱的形状反映了岩石节理、裂隙等岩石的完整程度;主频、带宽的大小反映了岩石结构、矿物成分、胶结好坏、风化程度等。初步结果是主频较高、带宽较大、相位随频率变化较大的岩体较坚硬、致密。岩体在加压破坏过程中,随着压力增加,主频、振幅均变小,频谱形状也发生变化,这一变化与裂隙产生、形成直至破坏的岩石变化过程相对应。

岩体超声频谱特性与岩体力学特性相关,因此,超声频谱测试技术为工程岩体特性检测、岩石分类、解决工程岩体问题等,提供了新的手段。

科苑快讯 **亚特兰蒂斯号返回地球**

据科技日报报道:与俄罗斯和平号太空站对接飞行 5 天后,美国亚特兰蒂斯号航天飞机缩短了飞行时间,提前与和平号分离并返回地球。

美俄两国宇航员顺利地进行了航天飞机与太空站的分离工作。不过,在两国宇航员通过

控制中心道别时,通话系统出了故障,延误了一些时间。

亚特兰蒂斯号与和平号分离后,于 3 月 30 日启程返回地球。美国女宇航员卢奇留在了和平号上,直到今年 8 月。其间,她将与俄罗斯宇航员一道,为明年建造永久太空站的计划搜集资料。