不同通道岩石破裂过程的相位谱分析

黄晓红¹,张凯月¹,刘祥鑫²,孙国庆³

(1.华北理工大学 信息工程学院,河北 唐山 063009;2.华北理工大学 矿业工程学院,河北 唐山 063009;3. 华北理工大学 电气工程学院,河北 唐山 063009)

摘 要:岩石受载破裂过程中释放的声发射信号携带大量声发射源的信息,岩石的宏观破裂表现在大破裂的 产生,大破裂往往伴随着大能量的产生,对大能量信号的研究是探究岩石破裂信息的关键。通过岩石劈裂破 坏实验,采用全相位 FFT 分析和小波包分解与重构的方法,重点分析不同通道声发射信号的相位谱特征,根 据相位属性,划分为线性以及非线性相位。研究结果表明:线性相位广泛存在于劈裂演化阶段。根据应力与 能量时间图将花岗岩破裂分为三个阶段: I 阶段劈裂成板, II 阶段剪切成块, II 阶段颗粒衍射。经小波分解 去噪与重构后的声发射信号其相位的线性特征更加明显,绝对相位的提出能快速准确的识别相位的类别。 不同通道的大能量声发射信号其绝对相位都是线性相位,这一结论为岩石破裂的阶段分析提供了重要思路。 关键词:全相位 FFT;小波包分解;重构;相位谱

中图分类号:TD231.1;TN911 文献标志码:B 文章编号:1001-0076(2017)03-0026-06 DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2017.03.005

Phase Spectrum Analysis of Rock Failure Process in Different Channels

HUANG Xiaohong¹, ZHANG Kaiyue¹, LIU Xiangxin², SUN Guoqing³

(1. College of Information Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China; 2. School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China; 3. College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Technology, Tangshan 063009, China)

Abstract: Acoustic emission signal released during rock burst carry lots of acoustic emission sources information. Macroscopic fracture of rock is performed in the generation of large fracture , and large rupture is usually accompanied by the generation of large energy . So research on the large energy signal is the key to the research of rock fracture information . All phase FFT and wavelet packet decomposition and reconstruction are used in the research of rock splitting failure , and the phase spectrum characteristics of acoustic emission signals of different channels are analyzed , and the linear and nonlinear phase are divided according to the phase properties . The results show that the linear phase exists widely in the split evolution stage . According to the stress and energy time diagram, the rupture of granite is divided into three stages : splitting into plates in stage I, cutting into pieces in stage II and scattering of particles in stage III. The linear feature of the phase of the absolute phase can identify the type of phase quickly and accurately . The absolute phase of the large energy acoustic emission signals of different channels is the linear phase of the stage analysis of rock failure .

* 收稿日期:2016-12-01

下方数据 作者简介:黄晓红(1973-),女,黑龙江海伦人,博士,教授,主要从事数字信号处理领域的教学与科研工作。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51374088);河北省钢铁联合基金(E2016209357);华北理工大学培育基金项目 (CP201506) 万方数据

Key words: all phase FFT; wavelet packet decomposition; reconstruction; phase spectrum

引 言

岩石从形变开始到完全发生破裂,是岩石内部 缺陷相互作用,微小裂纹产生并逐渐扩展的结果。 分析岩石破裂过程产生的声发射信号,是探讨岩石 破裂行之有效的手段^[1]。广大学者围绕岩石破裂 过程中不同参数展开广泛研究,并取得非常多有价 值的成果。凌同华和廖艳程^[2]利用小波包分析了 岩石的不同对信号频带能量分布的影响。张艳博和 黄晓红等^[3]采用 FFT 分析算法对含水砂岩单轴加 载下的声发射信号分析发现:其功率谱主要有两种, 且越接近破裂 B 类功率谱出现的越频繁,得出饱水 状态下的主频比自然状态下的窄,平均主频也低于 自然状态的。郭清露等^[4]对不同温度作用下的大 理岩渐进破环发现热损伤对破坏初期阶段的影响较 为明显,温度使得初期阶段声发射信号更为活跃。

总结广大学者的研究方向发现,大都致力于声 发射信号的能量分布特征、功率的类别、主频等去分 析岩石破裂的前兆信息,由此可见,通过分析相位谱 的特征去反演岩石破裂前兆信息至关重要。

本文采用全相位 FFT 和小波分解与重构的处 理方法,分析花岗岩加载破裂的各个阶段的相位谱 特征,这也为岩体工程灾害的监测提供一种可行的 途径。

1 基础理论

1.1 全相位 FFT

全相位 FFT(apFF)是近几年研究比较多的频 谱分析方法,与 FFT 相比较,其优点是:能够有效抑 制频谱泄漏和相位不变性^[5-6]。本文应用全相位的 这个优点去分析花岗岩破裂各个阶段相位谱特征发 现,在整个破裂过程只产生两位相位谱,如图1(a) 线性相位,(b)非线性相位。

1.2 小波分解与重构

岩石试件在受力或者对它进行加载时,会发生 形变,随着受力的增大,岩石试件逐渐发生破裂,同 时有大量的声发射信号带着声发射源的信息发射出 来,伴随近流数据问题是,声发射信号载有声发射源 的信息,也同时含有大量的噪声,声发射源的信息对 人们研究破裂前兆信息是有意义的,但是噪声的存 在干扰了研究人员准确无误的对破裂前兆信息做出 判断。本文对花岗岩劈裂破坏实验获得的声发射信 号进行小波分解与重构,最大可能地保护有留有用 信息,去除无用信息。



在黄晓红等^[7]以往的研究中,对声发射信号的 去噪处理,大部分为小波阈值去噪,阈值的确定不能 很好掌握,阈值定的过大,去除一部分有用信息阈 值定的过小,则达不到真正去噪的目的。本文采用 小波包分解去噪,将花岗岩声发射信号分为三层,小 波分解原理如图 2 所示,其中 CA3 表示第三层小波



分解的低频子信号,CD 3 为第三层小波分解的高频 子信号,CD2 为第二层小波分解的高频子信号,CD1 为第一层小波分解的高频子信号。将花岗岩声发射 信号分解为三层,第三层有八个能谱系数,选取花岗 岩劈裂实验中的一、二、四和五通道的声发射信号进 行分析,首先分别随机选取不同通道的5 组声发射 信号,进行小波包分解,分解的能谱系数如表1所示:CA31、CD31和CD32这三个频段的能谱系数占 到整个频段能谱系数的95%以上,也就是说这三个频段携带了声发射信号的主要信息,将其他频段的 能谱系数置0,然后将声发射信号进行重组。

表1 不同通道声发射信号的能谱系数

	CA31	CD31	CA32	CD32	CA33	CD33	CA34	CD34
一通道	64.026	28.656	0.409 03	6.3363	0.011 321	0.17034	0.204 57	0.186 03
	64.026	28.656	0.409 03	6.3363	0.011 321	0.17034	0.204 57	0.186 03
	51.751	40.435	0.786 34	6318 8	0.056 134	0.098 668	0.368 99	0.184 66
	27.27	51.513	1.238 5	17.121	0. 126 78	0.105 34	2.326 1	0.299 22
	23.75	58.271	1.292 9	15.152	0.054 207	0.12045	0.74477	0.616 09
二通道	46.407	44.471	1.952 8	5.8704	0111 1	0.225 45	0.717 17	0.245 3
	4.9978	83.069	0.763 34	8.638	0.025 533	0.063 714	1.3652	1.077
	50.029	43.765	0.155 89	5.9663	0.001 114 2	0.011 408	0.049 597	0.021 753
	36.045	57.395	0.099 763	6.3954	0.000 646 74	0.008 817 8	0046 129	0.009 452 9
	57.993	32.368	0.479 45	8.0794	0.010 507	0.033 189	0.863 58	0. 172 98
四通道	38.105	44.568	2.629 1	9.8632	0.138 31	0.11071	4.2989	0.287 44
	66.346	29.312	0.125 14	4.115 1	0.001 217 1	0.007 622 8	0.066 93	0.025 185
	56.395	37.107	0.237 57	6.024 9	0.009 546 9	0.011 968	0.150 21	0.064 617
	38.3	45.749	1.986 9	10.585	0.112 75	0.118 79	2.5169	0.6309
	66.552	27.304	0.533 63	4.954 1	0.016 794	0.034 215	0.491 02	0.114 28
五通道	68.869	27979	0.102 22	2.9263	0.022 673	0.025 459	0.041 183	0.033 627
	93.806	4.6609	0. 179 33	0.995 62	0.052 167	0.078 091	0.131 46	0.096 195
	62.91	31.634	0.425 27	4.380 5	0.078 459	0.088 502	0.373 37	0.110 55
	79.837	18.099	0035 686	1.9749	0.007 941	0. 021 855	0.010 498	0.013 857
	83.565	15.592	0.060 171	0.714 16	0.008 947 4	0.020 263	0.023 83	0.015 145

重组后的信号与原声发射信号进行比较,其互 相关系数如表2所示:经小波包分解后重组的声发 射信号其相关系数都在0.9以上,说明重组后的信 号包含了原声发射信号的有用信息,去除掉了噪声, 对重组后的声发射信号进行分析,更能真实地反映 声发射源的相关信息。

表 2 不同通道能量前 20 的互相关系数

					相关系数					
一通道	0.9999	0.986 2	0.988 5	0991 4	0.9747	0.9959	0.9908	0.982 4	0.9587	0.9916
	0.9978	0.9977	0.9996	0.9974	0.998 2	0.992 0	0.984 3	0.9927	0.995 5	0.9990
二通道	0.9915	0.9997	0.9910	0.998 5	0.9993	0.9998	0.9999	0.9956	0.9687	0969 0
	0.9981	0.9992	0.984 2	0.9946	0.976 0	0.9999	0.9499	0.9995	0. 993 9	0.9999
四通道	0.9994	0.9956	0.998 8	0.9687	0.998 8	0.9998	0.9999	0.9969	0.9998	0.9989
	0.9999	0.9997	0.9997	0.9992	0999 2	0.9969	1.000 0	0.998 3	0.9960	0.9988
五通道	1.000 0	1.000 0	0.998 8	0.9996	0.9999	1.000 0	1.000 0	0.9999	0.9916	0.9999
	0.9803	0.993 3	0.998 1	1.000 0	0.9996	0.9994	0.9989	0.9998	0.998 2	0.9998

2 试验设计

试验采用数据岩试件,长宽高均为150 mm,中

间钻直径为 45 mm 的通孔,对试样进行仔细研磨, 使其平整度符合岩石力学实验规程。

试验加载系统选用 RLW - 3000 微机控制双轴

伺服压力实验机,如图 3(a)。声发射仪是美国声学 物理公司生产的 PCI-2型声发射监测系统,如图 3 (b)。其中前置放大器增益值为 40 dB,声发射采样 信号门槛值为 45 dB,波形采样率为 1 MSPS,长度为 2 K。声发射传感器选择 R6α 型谐振式高灵敏度传 感器,该传感器在 0 ~ 350 kHz 的均为有效增益,在 试验操作之前,为了增大传感器和试样的耦合性,在 二者之间涂抹凡士林。



(a) RLW-3000 (b) PCI-2 图 3 试验系统

轴向和水平方向均采用力控制方式,试验过程分为两步(1)水平方向加载到300 kN,同时轴向加载 到花岗岩单轴抗压强度的90%;(2 保载5 min 后水 平方向以40 mm/min 的速度卸载,轴向位移不变^[8]。

3 试验结果分析

3.1 花岗岩的破坏过程分析



如图 4 所示为不同通道的能量 – 时间曲线图, 整体而言,破裂的发生具有群聚效应,在 t1,t2,t3 时 间区域均**片形数据**同程度的响应。临近最终破裂及 破裂时刻,四个通道的声发射能量均出现了响应最强的情况,这与该时间断破裂发生时所耗散的能量大小有密切关系。此外,在t1时间区域,五通道声发射能量很低,这可能是产生了张开型裂纹,阻断了声发射信号的传播。在主应力空间中,弹性应变能通常沿最小主应力或拉应力集中处释放,根据图5的水平与轴向应力时间图将花岗岩不同通道的破裂分为三个阶段(t1,t2 t3 为各阶段时间拐点):

I阶段(0-t1)为岩石轴向处于加载阶段,岩石 试件并没有产生明显破裂,此时的声发射信号由试 件本身的微小孔隙、裂隙等被压密所致;此阶段没有 连续较大能量释放。

Ⅱ阶段(t1-t2)为水平和轴向的保载阶段:水 平应力、轴向应力保持不变,但在孔洞左右边壁的应 力集中区已经出现破裂,但在现场的隧洞工程中,隧 洞表面围岩一般都会喷射混凝土,此现象在现场很 难观测到。

Ⅲ阶段(t2-t3)为水平卸荷阶段:水平卸荷作 用导致水平应力快速下降,当水平应力降至最低值 时轴向应力发生阶跃式下降。试件整体发生严重破 坏,此时较大能量被连续释放。



图5 应力时间图

3.2 声发射信号不同类相位的确定

相位测量在电子、通讯、仪器测量、工程监控等 很多领域当中都普遍存在并广泛使用^[9]。相位频 谱在声呐、雷达等领域中的作用是通过对声波、超声 波时间延迟的估计,来确定水下目标的具体位 置^[10]。本文试运用相位的规律来反演岩石破裂前 兆信息。

在张艳博等^[3]以往的研究中,仅取每一阶段有 限组数据凭肉眼观测来确定相位的类别,形如图1 (a)的为线性相位,形如图1(b)的为非线性相位。 本文试确定一个阈值,在大数据的发展时期,让计算 机自动识别相位,这样既确保数据的完整性,又能节 省大量的时间。

为了能快速准确地区分相位的类别,经研究引入一个新的参数:绝对相位。绝对相位的定义为:一 个声发射信号 *f*(*x*)在非均质、各向异性的粘弹性介质中传播,当前时间点 *t_i*所对应信号的相位 φ_i与后 一时间点 *t_{i+1}*所对应信号的相位 φ_{i+1}的变化量经 Matlab 中 phase 函数处理后的角度。

$$f^*(x) = \text{phase}(\varphi_{i+1} - \varphi_i) \tag{1}$$

在花岗岩破裂试验中收集的声发射信号是由破 裂发出的真实信号与高斯白带噪声共同构成,如下 公式所示:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} A_{i} \sin (\varphi_{i}x + \varphi_{0}) + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{A_{0}}{2} e^{j\omega\tau} d_{\omega} + \theta(x)$$
(2)

将上述信号进行小波分解与重构处理,得到下 面去噪后的信号。

$$f'(x) = \sum_{i}^{n} A_{i} \sin \left(\varphi_{i} x + \varphi_{0} \right)$$
(3)

将声发射信号进行去噪处理,收集去噪之后的 信号进行公式(1)中的操作,发现声发射信号呈现 图6中两种相位类型。如图6中(a)、(b)所示:非 线性相位对应的绝对相位在靠近中间频率(220~ 280 kHz)时存在一条斜率近似为非0的直线。 (c)、(d)中线性相位对应的绝对相位在靠近中间频 率(220~280 kHz)存在一条斜率近似为0的直线。



绝对相位物理直观地区分了线性相位与非线性

相位,能在大量数据中快速提取线性相位,本文针对同一声发射信号的绝对相位值进行如下计算:

$$\begin{cases} f^{*'}(x) = \frac{\sum_{i_{1}}^{i_{2}} \frac{d_{y}}{d_{x}}}{t_{2} - t_{1}} < X \quad \text{线性相位} \\ f^{*'}(x) = \frac{\sum_{i_{1}}^{i_{2}} \frac{d_{y}}{d_{x}}}{t_{2} - t_{1}} > X \quad \text{非线性相位} \end{cases}$$
(4)

式中 t_1 为绝对相位出现线性阶段的起始点, t_2 为结束点, $\sum_{t_1}^{t_2} \frac{d_y}{d_x}$ 为选中时间段直线的斜率,X为设定的阈值。本文中 t_1 为220, t_2 为280,X为10⁻³。

3.3 小波阈值去噪与分解重构去噪的对比

本文选取花岗岩劈裂试验中四个通道的数据进 行分析,分别选取每个通道的能量前20的数据,在 黄晓红以往的研究中,用的是小波阈值去噪的方式, 用小波阈值去噪分析不同通道的大能量数据可以发 现,以一通道为例进行具体说明,如图7所示:



图 7 小波阈值去噪后的相位谱

一通道中能量前20组数据当中,用小波阈值去 噪之后,只有四组数据的相位表现为非线性相位,其 他声发射信号均表现为线性相位。用小波分解与重 构的方法对同组数据进行去噪处理,与图7相对应 的四组数据如图8所示:经小波包分解重构之后的 声发射信号,其绝对相位都表现为线性相位,图7 (c)、(d)与图8(c)、(d)相比可以发现,后者的相位 也变成线性相位。由此可以说明,小波分解与重构去 噪更能真实反映声发射信号所携带的声发射源信息。



图 8 小波分解重构去噪后的相位谱

3.4 不同通道大能量对应的相位谱特征

岩石的破裂最直观的表现就是大破裂的出现, 大破裂伴随着大能量的产生,从而引起岩石的宏观 破裂。声发射信号大能量的出现,有可能是大破裂 的出现引发的,也可能是小破裂在某一时刻同时发 生应变能累加引发的。所以对大能量的研究是探索 岩石破裂程度的关键。

线性相位是指岩石破裂过程中能量释放比较大的点其特有的相位特征,宏观破坏是指破坏尺度与 岩石尺寸之间的比值大到一定数值时的破裂,此处 的相位表现为线性相位。分析通道一中的大能量点 的数据可以发现,能量前20的数据其绝对相位都是 线性相位,为了验证能量较大值点的绝对相位都有 线性特征,文中选取花岗岩劈裂试验四个通道的声 发射信号进行相位谱的分析。分别将四个通道中的 声发射信号按能量有大到小排列,选取能量前20的 声发射信号做 apFFT 变换,最后分析其相位与绝对 相位的特征,探究相位与破裂程度的关系。如表3 所示:不同通道中大能量点对应的绝对相位都是线 性相位,即大能量对应的绝对相位都是线性的,这一 结果对于探寻岩石破裂程度提供可靠的思路。

表 3	不同通道大能量点对应的相位
-----	---------------

	—————————————————————————————————————						
通道	线性相位	线性绝对相位					
一通道	18	20					
二通道	20	20					
四通道	19	20					
五通道	20	20					
一 万奴1	店						

4 结论

本文用小波分解与重构的方法能更好地去除声 发射信号所携带的噪声,声发射信号绝对相位参量 的提出能够快速准确地反映当前岩石的损伤破裂信 息,为捕捉岩石失稳前兆规律,预测岩体工程破坏提 供一种可行的方法。

(1)本文采用 apFFT 算法与小波分解与重构方法,分析花岗岩失稳破裂过程中破裂前兆信息,经过小波包分解后发现声发射信号的有用信息在 CA31、CD31、CD32 频段,将其他频段能谱系数置0后进行信号重组,重组后的信号其相位谱的线性特征更加明显。

(2)绝对相位的提出、阈值的确定为快速识别 相位类型提供了依据。

(3)不同通道接收同一声源发出的声发射信号, 大能量点的声发射信号对应的绝对相位均为线性相 位,这一结论为寻找岩石破裂时刻提供重要依据。

参考文献:

- [1] 刘祥鑫.不同岩石声发射时频特性及其信号识别技术研究 [D].赣州:江西理工大学,2012.
- [2] 凌同华,廖艳程,张胜.冲击荷载下岩石声发射信号能量特征的小波包分析[J].振动与冲击,2010(10):127-130,255.
- [3] 张艳博,黄晓红,李莎莎,等.含水砂岩在破坏过程中的频谱 特性分析[J].岩土力学,2013(6):1574-1578.
- [4] 郭清露,荣冠,姚孟迪,等.大理岩热损伤声发射力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015(12):2388-2400.
- [5] 王兆华,候正信,苏飞.全相位 FFT频谱分析[C]//中国通信 学会通信理论与信号处理专业委员会.现代通信理论与信 号处理进展——2003年通信理论与信号处理年会论文集. 北京:中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会, 2003;4.
- [6] 黄翔东. 全相位数字信号处理[D]. 天津:天津大学,2007.
- [7] 黄晓红,李莎莎,张艳博,等.水对岩石破裂失稳过程声发射频谱特征的影响[J].矿业研究与开发,2013(6):38-41,83.
- [8] 张艳博,于光远,田宝柱,等.花岗岩巷道岩爆声发射信号时 频特性实验研究[J].矿业研究与开发,2015(8):72-76.
- [9] 孙进才,朱维杰.信号相位匹配原理及其应用[M].西安:西 北工业大学出版社,2005:8-12.
- [10] 黄晓红,席婷,张艳博,等.石灰岩声发射分析及源定位研 究[J].矿业研究与开发,2014(3):53.