

基于小波变换的岩芯卸荷扰动声学反应分析

俞 缙¹, 赵维炳¹, 李晓昭², 徐鸣洁², 鲁绪文¹

(1. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210029; 2. 南京大学 地球科学系, 江苏 南京 210093)

摘要: 现行国家规范将岩体与岩块的纵波速度比的平方定义为岩体的完整性, 这是由于通常情况下原位岩体的纵波波速低于其中岩块的波速, 岩体越破碎, 波速低得越多。通过对南京地铁工程围岩声波测井及岩芯声波测量发现, 用通常手段得到的一部分岩体的测井波速反而大于岩芯波速, 分析其原因主要是岩芯受卸荷及钻取扰动影响造成的。为更好地对岩芯卸荷扰动的声学反应进行分析, 基于小波变换方法, 将岩芯声波信号分解成不同频带通道的小波分量, 进而对其进行时频分析, 得到的各频带分量及其加权频谱参数与岩芯卸荷扰动敏感程度具有良好的相关性, 表明该方法在分析岩芯卸荷扰动问题上具有优越性。

关键词: 岩石力学; 小波变换; 岩芯卸荷扰动; 波速; 频谱参数

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 3558 - 07

ANALYSIS OF ACOUSTIC RESPONSES TO ROCK CORE UNLOADING-DISTURBANCE BASED ON WAVELET TRANSFORMATION

YU Jin¹, ZHAO Weibing¹, LI Xiaozhao², XU Mingjie², LU Xuwen¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China;
2. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: According to the present national standards, the square of the ratio of longitudinal wave(P-wave) velocity of rock mass to that of rock block is defined as intactness index of rock mass. It is well known that the P-wave velocity of in-situ rock mass is believed to be lower than that of relevant rock block commonly. The more broken the rock mass is, the lower its P-wave velocity than that of rock block is. Acoustic logging and wave velocity measurement of rock cores are applied to bedrock of Nanjing subway engineering. It is found that most wave velocities of rock mass are greater than those of rock cores; and the cause is unloading-disturbance influence on rock cores. In order to analyze the acoustic responses of rock core unloading-disturbance more availably, wavelet transformation method is applied to decompose the rock core acoustic signals into wavelet components belonging to various frequency channels; and weight spectrum parameters are given after time-frequency analysis of the channel signals. There are good relationships between the data of rock core acoustic signals and rock core sensitivity degree of unloading-disturbance. It indicates that the wavelet transformation method is superior for rock cores unloading-disturbance analysis.

Key words: rock mechanics; wavelet transformation; rock core unloading-disturbance; wave velocity; spectrum parameters

1 引 言

声波在岩体中的传播与其在均匀、各向同性的

完整岩石中不同。岩体中结构面的存在不仅使波速明显下降, 而且会使其传播能量有不同程度的消耗。因此声波测试成为工程岩体分级与质量评价、岩体风化带划分、岩体动弹性参数确定的主要指标与

收稿日期: 2007 - 04 - 17; **修回日期:** 2007 - 05 - 14

基金项目: 南京水利科学研究院博士研究生基金项目(YY30602)

作者简介: 俞缙(1978 -), 男, 2003 年于南京大学地球科学系地质工程专业获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程测试技术及地基处理方法与计算方面的研究工作。E-mail: bugyu0717@163.com

参量的最主要手段之一^[1~15]。现行国家标准^[16, 17]还将岩体与岩块纵波波速比的平方定义为岩体完整性系数。这是由于通常情况下原位岩体的纵波波速低于其中岩块的波速, 岩体越破碎波速低得越多。

然而笔者在南京地铁工程围岩声波测试中发现, 岩体测井波速很多情况下高于岩样波速, 这一结果与传统认识大不相同。李晓昭等^[1]在润扬大桥基岩的声波测试中已经注意到该问题, 通过节理裂隙统计、抗压强度试验、波速测试、声波信号频谱分析等多种手段, 对桥基数百个岩芯进行对比研究结果发现: 软弱、破碎、裂隙发育、胶结差的岩芯纵波波速容易低于岩体波速, 并初步探讨了其产生原因, 是岩芯对卸荷及钻取扰动比较敏感造成的。其中频谱分析采用了传统的Fourier变换方法, 但由于岩石声波信号所固有的特点及复杂性, Fourier变换在声波信号的时频分析方面存在着很大的局限性^[5]。为此, 本文基于小波变换方法, 结合南京地铁工程, 对岩芯受卸荷扰动的声学反应作了更进一步的分析与探讨。

2 南京地铁工程围岩声波测试

南京地铁工程沿线穿越不同的地层与地质构造, 基岩岩性主要为安山岩、砂岩、闪长岩、灰岩、泥岩等。在工程勘察声波测试工作中, 声测井 20 余口, 取岩芯 150 余块(均取自相应孔位), 并在室内进行了常温、常压及水饱和状态下岩芯波速、密度以及单轴抗压强度测量^[2]。

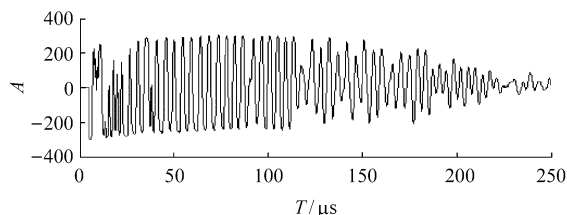
2.1 声波测试方法

测井中使用DB4多波参数分析仪, 由便携式计算机控制, 数字化采集。采用的激发电压为1 kV, 采样间隔为0.2 ms, 探头为30 kHz的一发双收探头。测井原理见徐鸣洁等^[2]的研究。岩芯测量所用探头频率为240 kHz, 采样间隔为0.1 ms, 测量方式采用透射法^[10, 11]。探头对零激发信号的时域、频域曲线如图1所示。

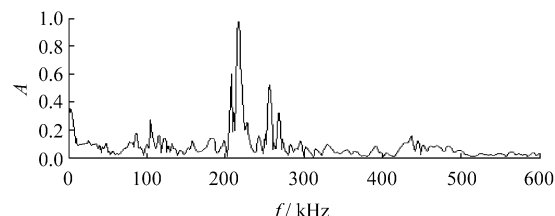
2.2 声波测试结果

对基岩20余个钻孔以及150余块岩芯进行声波原位及室内测试。因强风化岩芯饱水易碎, 测试难度较大, 故本文中仅列出中~微风化岩芯测试数据统计结果, 见表1、图2。

对比可见, 一部分岩样纵波波速明显小于原位测井纵波波速。其他工程如南京长江二桥、鲁布革



(a) 探头激发信号的时域特征



(b) 探头激发振幅谱

图 1 探头激发信号的时域、频域曲线

Fig.1 Exciting spectrum curves of transducer in time and frequency domains

表 1 南京地铁工程围岩波速测试结果统计

Table 1 Statistics results of longitudinal wave velocity of bedrock in Nanjing subway engineering

岩组名称	岩组代号	样品数	岩芯波速 V_{rp} 与岩体波速 V_{mp} 的关系	
			小于岩体波速 V_{mp} 个数	小于岩体波速 V_{mp} 比例/%
中风化闪长岩	δ_{u-2}	10	4	40
中风化闪长玢岩	δ_{u-2a}	4	1	25
中风化安山岩	J_{3L-2}	13	8	62
中~微风化砾岩	K_{2p-2-3}	13	3	23
中风化砂岩	$J_{1-2xh-2}$	2	0	0
中风化角砾岩	T_{2Z-2}	7	2	29
中~微风化粉砂质泥岩	K_{lg-2-3}	41	11	27
断层破碎带	Fr	7	5	71

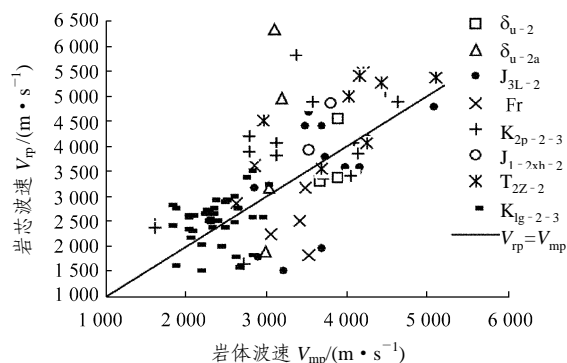


图 2 南京地铁沿线各类岩体波速测试结果

Fig.2 Some testing results of longitudinal wave velocity of various types of bedrock in Nanjing subway engineering

水电站也出现了类似情况的测试结果^[1]。分析其原因，主要是岩芯受钻取扰动以及卸荷作用影响造成的^[1]。声波波速是一种综合指标，单纯从波速角度去分析岩芯受卸荷扰动的影响程度容易丢失许多有用的信息，因此，本次研究引入了小波变换方法对岩芯声波信号进行时频分析。

3 小波变换

小波分析思想来源于伸缩与平移法，它具有随着信号频率升高时间分辨率也相应升高的特性，该优点满足对岩石声波信号这种具有多尺度特征的信号进行时频分析定位的要求。

3.1 连续小波变换

函数 $f(t)$ 的连续小波变换的表达式为

$$WT_f(a, b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (1)$$

式中： $\psi_{a,b}(t)$ 为依赖于参数 a, b 的小波基函数，且 $\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ ($a, b \in R$)； $\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$ 为 ψ 的共轭。相应的小波逆变换为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} WT_f(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{da db}{a^2} \quad (2)$$

式中： C_ψ 为 $\psi(t)$ 的 Fourier 变换， $C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \hat{\psi}(\omega) \right|^2 \frac{d\omega}{\omega}$ 。

3.2 离散小波变换

连续小波变换在计算机实现时，必须加以离散化。把连续小波变换中的尺度参数 a 和平移参数 b 离散化形式分别取作 $a = a_0^j, b = ka_0^j b_0$ ，则有

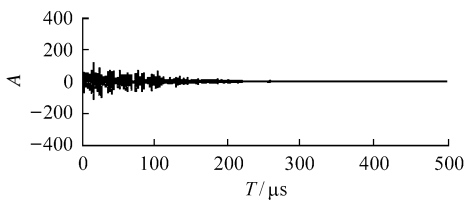
$$C_f(j, k) = a_0^{-\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi(a_0^{-j} t - kb_0)} dt \quad (3)$$

在实际工作中，常取 $a_0=2, b_0=1$ ，即取二进制小波。由式(3)可以看出，小波变换对不同的频率成分在空间域上的取样步长是具有调节作用的，高频者(对应于小的 j 值)取样步长小，低频者(对应于大的 j 值)取样步长大。因此小波变换能将信号分解成交织在一起的多种尺度成分，并对于大小不同的尺度成分采用相应粗细的空间域取样步长，从而能够不断地聚焦到对象的任意微小细节。

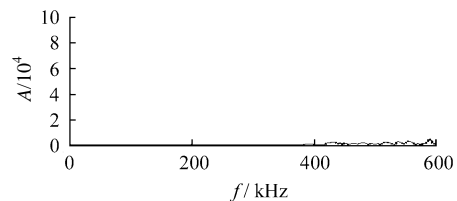
3.3 计算机仿真实例

为验证小波变换方法在岩石声波信号分析中的有效性，确定最优小波基与分析尺度，利用本次岩芯测试探头对零激发信号(图 1)，采用不同类型小波基对其进行不同尺度下的小波变换与重构，进而将重构信号与原始信号进行误差对比分析，最终确定误差最小的 db4 小波为最优小波基，进行 8 尺度小波分析(详细过程见作者^[3]的研究)，分析结果如图 3 所示，由于属高频干扰，故图中未列出第 1, 2 层小波分量。

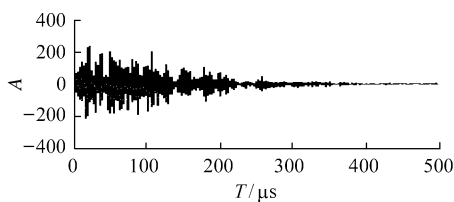
由图 3 可见，声波信号通过小波变换后被分解为不同频带通道的信号，弥补了传统的 Fourier 变换时窗口大小不随频率变化而改变的缺陷，从而可以分别对每个频带通道的信号进行独立分析。



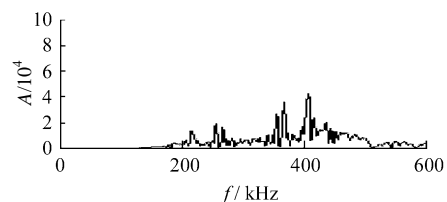
(a) D3(时域)



(b) D3(频域)



(c) D4(时域)



(d) D4(频域)

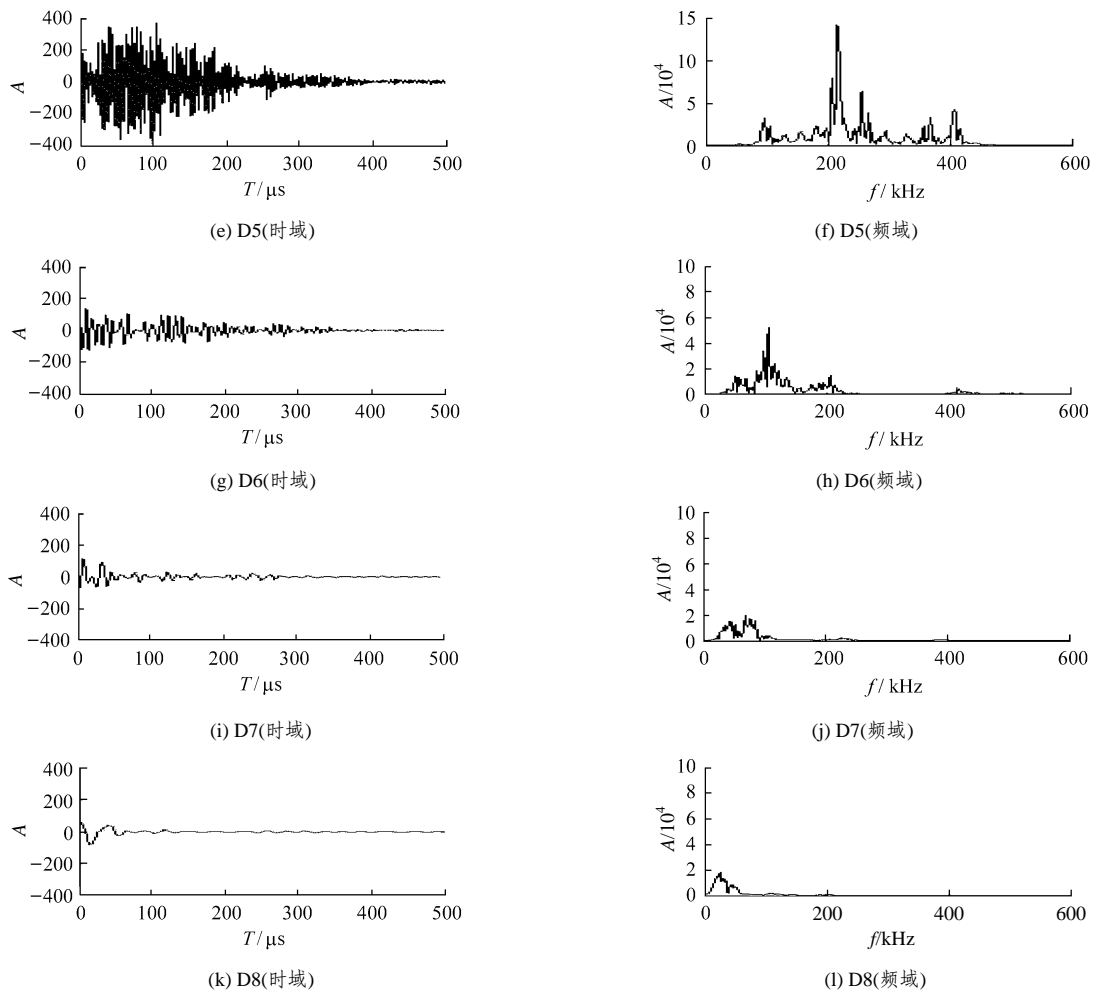


图 3 超声激发信号的小波变换

Fig.3 Wavelet transformation of acoustic exciting wave signal of transducer

4 岩芯卸荷扰动声学反应分析

本次研究对岩芯进行了大量的声波信号小波分析, 现以 XND16 孔(角砾岩)为例具体分析。该孔岩芯特征与测试结果见表 2。

运用 db4 小波基, 对各岩芯声波信号进行 8 尺度小波分析。因结果图数量很大, 本文仅列出第 5 层分析结果, 如图 4 所示。

由表 2、图 4 可以看出, XND16-4, XND16-7 样品强度较低, 波速与岩体测井波速相比有明显降低。其声波信号的第 5 层小波分量波动幅度明显低于其余岩芯, 频谱上只在 200 kHz 上有微弱起伏, 350 kHz 处之后的波动已经岩芯滤波作用衰减干净。观察岩芯, XND16-4 样品含两组裂隙, 夹角 10°~50°, 微闭~微张, 局部发育小溶孔; XND16-7 样品含一组缓倾裂隙, 泥质胶结。其余岩芯强度、

表 2 XND16 孔岩芯特征和测试结果

Table 2 Characters of rock cores and testing results in borehole XND16

样品号	取样深度/m	岩芯天然密度 ρ / $(g \cdot cm^{-3})$	岩体测井波速 V_{mp} / $(m \cdot s^{-1})$	岩芯波速 V_{rp} / $(m \cdot s^{-1})$	$V_{rp} - V_{mp}$ / $(m \cdot s^{-1})$	岩芯单轴抗压强度 R_c /MPa
XND16-1	22.4~22.75	2.53	4 435	5 276	841	27.10
XND16-2	24.1~24.4	2.47	2 970	4 510	1 540	45.38
XND16-3	25.4~25.8	2.56	4 207	5 481	1 274	91.46
XND16-4	27.0~27.5	2.47	3 676	3 548	-128	5.72
XND16-5	28.5~28.9	2.50	4 021	5 000	979	11.84
XND16-6	30.0~30.6	2.60	5 104	5 360	256	5.24
XND16-7	31.1~31.6	2.49	4 237	4 055	-182	17.15

波速均较高, 裂隙不发育、胶结好。频谱上在 200~400 kHz 频段均有明显响应, 说明介质滤波作用不明显。

另外, 采用加权波谱参数对频谱进行定量化分

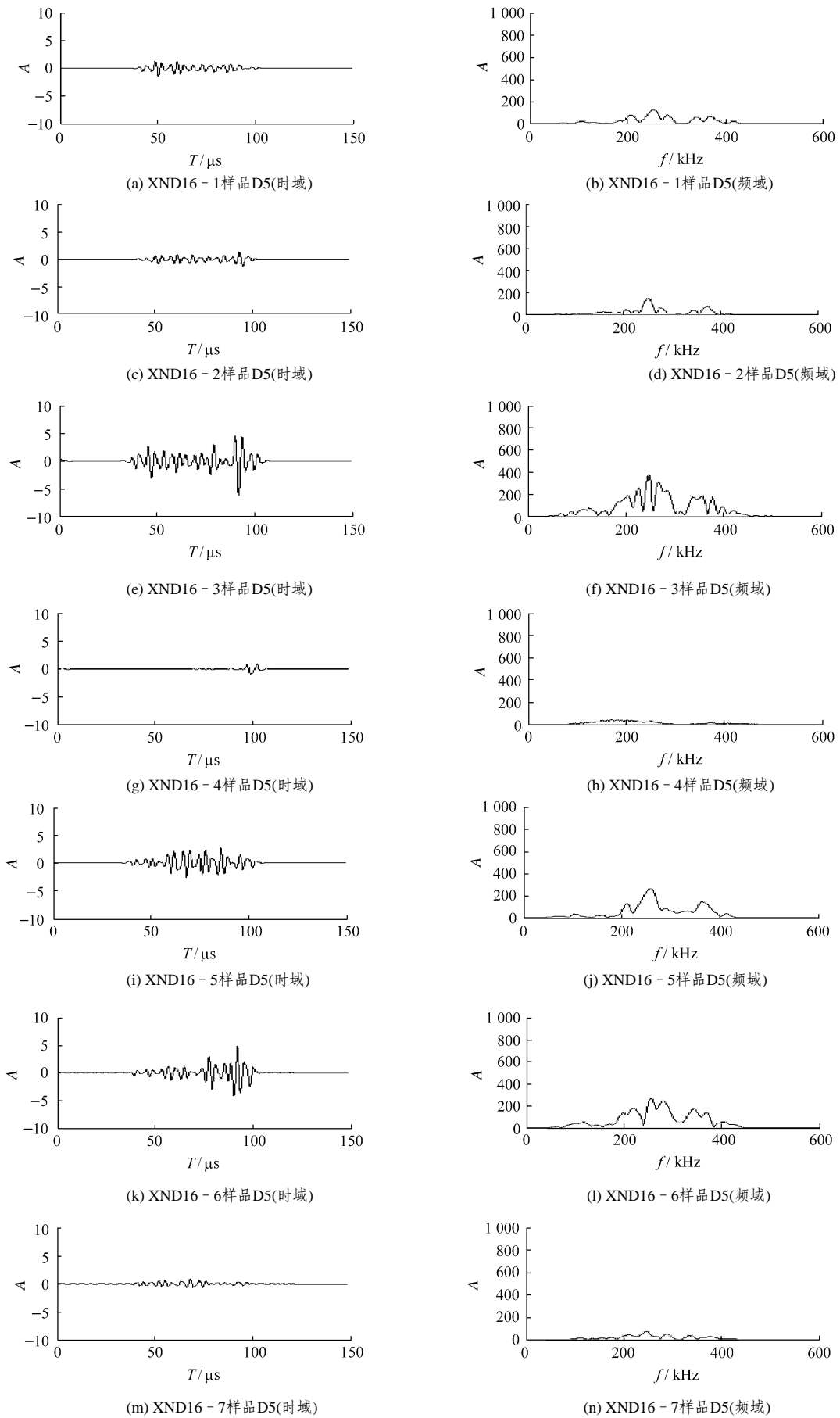


图4 XND16 孔岩芯声波第5层小波及频谱分析图

Fig.4 The 5th wavelet transformation and spectrum of borehole XND16

析: 将岩芯声波信号第 1, 2 层小波分量视为高频干扰, 将频域最大振幅、谱面积及主频作为频谱参数, 对 3~8 层小波分量的这 3 个参数进行加权计算, 得到的加权波谱参数是声波信号在不同频带上的能量以及频率特性的综合反映, 结果见表 3。从表 3 可以看出, 样品 XND16-4, XND16-7 的各项频谱参数均小于其余样品。

表 3 XND16 孔岩芯声波频谱参数

Table 3 Spectrum parameters results of borehole XND16

样品号	加权最大振幅与最大 大值之比	加权谱面积与最大 值之比	加权主频与最大 大值之比
XND16-1	1.000	0.893	1.000
XND16-2	0.529	0.875	0.446
XND16-3	0.319	0.964	0.506
XND16-4	0.050	0.179	0.121
XND16-5	0.243	0.929	0.208
XND16-6	0.267	1.000	0.271
XND16-7	0.062	0.127	0.094

综上所述, 强度及波速测试结果、声波信号小波分析结果及频谱参数的计算结果之间具有明显的相关性。说明小波分析方法具有的时频分析特性, 在研究对卸荷扰动较敏感的岩芯声波信号特征时优势明显。

5 结 论

(1) 通过南京地铁围岩声波测试发现, 部分岩芯纵波速度小于对应深度下测井波速, 这一结果与传统认识不同。

(2) 对岩芯声波信号进行小波变换, 发现对于卸荷扰动作用敏感的岩芯, 其声波小波分量波动明显小于对卸荷作用不敏感的岩芯声波信号, 并且其高频成分被岩芯滤波作用衰减干净。

(3) 采用基于小波变换的加权频谱参数对岩芯声波信号进行分析, 发现各参数与岩芯对于卸荷扰动敏感程度相关性良好。

(4) 由于声波对岩芯卸荷扰动十分敏感, 在使用波速指标进行工程岩体分级, 尤其是完整性系数的确定时应慎重。应结合声波频域信息、岩芯鉴别描述、裂隙统计等方法综合分析, 以免误判。

(5) 要对信号做进一步精细分析, 还必须对声

波在岩石中的传播机制进行大量的研究。如果能弄清声波信号中各组成波的时频特性, 这时采用小波理论进行分析, 将显示出它更强大的分析能力。

参考文献(References):

- [1] 李晓昭, 安英杰, 俞 缙, 等. 岩芯卸荷扰动的声学反应与卸荷敏感岩体[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2 086 - 2 092. (LI Xiaozhao, AN Yingjie, YU Jin, et al. Acoustic responses to rock core unloading-disturbance and unloading-sensitive rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(12): 2 086 - 2 092.(in Chinese))
- [2] 徐鸣洁, 钟 锴, 俞 缙, 等. 南京地铁工程勘察中声波测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1 018 - 1 024.(XU Mingjie, ZHONG Kai, YU Jin, et al. Acoustic measurement and analysis of Nanjing subway engineering investigation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1 018 - 1 024.(in Chinese))
- [3] 俞 缙. 岩石声波信号小波分析研究及其工程应用[硕士学位论文][D]. 南京: 南京大学, 2003.(YU Jin. Study on the wavelet analysis for rock acoustic signals and its engineering application[M. S. Thesis][D]. Nanjing: Nanjing University, 2003.(in Chinese))
- [4] 俞 缙, 李晓昭, 章杨松, 等. 岩体超声波分级与其他分级体系的对比分析[C]// 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会桩基础学术委员会、中国工程建设标准化协会地基基础委员会桩与深基础分会第六届联合年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 304 - 309.(YU Jin, LI Xiaozhao, ZHANG Yangsong, et al. Contrast between the ultrasonic identification of rock mass classification and other system[C]// Proceedings of the 6th National Conference of Pile Foundation Committee of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Commission of China Civil Engineering Society and Pile and Deep Foundation Committee of Foundation Commission of the Construction Standard Committee of China. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003: 304 - 309.(in Chinese))
- [5] 赵明阶, 吴德伦. 小波变换理论及其在岩石声学特性研究中的应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 47 - 51.(ZHAO Mingjie, WU Delun. Wavelet transformation and its application in the study of rock acoustic properties[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(6): 47 - 51.(in Chinese))
- [6] 赵明阶. 二维应力场作用下岩体弹性波速与衰减特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 123 - 130.(ZHAO Mingjie. Study

- on wave velocity and attenuation of rock mass in 2D stresses field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 123 - 130.(in Chinese))
- [7] 李雪峰, 韩文峰, 谌文武. 大柳树坝址松动岩体波速特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 596 - 600.(LI Xuefeng, HAN Wenfeng, CHEN Wenwu. Wave velocity characteristics of dynamo-relaxed rock mass at site of Daliushu dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 596 - 600.(in Chinese))
- [8] 朱合华, 周治国, 邓涛. 饱水对致密岩石声学参数影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 823 - 828.(ZHU Hehua, ZHOU Zhiguo, DENG Tao. Acoustic parameters of low-porosity rock under dry and saturated conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 823 - 828.(in Chinese))
- [9] 丁梧秀, 姚增, 蒋振. 岩体工程特性研究中弹性波速参数取值方法探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1 353 - 1 356.(DING Wuxiu, YAO Zeng, JIANG Zhen. Study on methods of how to select reasonably elastic wave velocity parameters of engineering rockmass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1 353 - 1 356.(in Chinese))
- [10] 刘彤, 苏天明, 孙健. 岩石声波差异衰减特征及工程应用探讨[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 822 - 827.(LIU Tong, SU Tianming, SUN Jian. Study on acoustic diversity attenuation properties of rock and foreground of application in engineering[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(3): 822 - 827.(in Chinese))
- [11] 刘彤, 徐鸣洁, 胡德昭, 等. 风化花岗岩声谱特征分析[J]. 高校地质学报, 2000, 6(4): 588 - 594.(LIU Tong, XU Mingjie, HU Dezhao, et al. Study on acoustic spectral characteristics of weathered granite[J]. Geological Journal of China Universities, 2000, 6(4): 588 - 594.(in Chinese))
- [12] 刘斌, KERN H, POPPT. 不同围压下孔隙度不同的干燥及水饱和岩样中的纵横波速度及衰减[J]. 地球物理学报, 1998, 41(4): 537 - 546.(LIU Bin, KERN H, POPPT. Velocities and attenuation of P- and S-waves in dry and wet rocks with different porosities under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1998, 41(4): 537 - 546.(in Chinese))
- [13] BIENIASKI Z T. Engineering rock mass classification: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineers[M]. New York: Wiley, 1989.
- [14] BUDETTA P, DE RISO R, DE LUCA C. Correlations between jointing and seismic velocities in highly fractured rock masses[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2001, 60(3): 185 - 192.
- [15] NAKAGAWA S. Acoustic resonance characteristics of rock and concrete containing fractures[Ph. D. Thesis][D]. Berkeley: University of California, 1998.
- [16] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50218 - 94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50218 - 94 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.(in Chinese))
- [17] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50266 - 99 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T50266 - 99 Standard for tests method of engineering rock mass[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.(in Chinese))