

南京地铁工程勘察中声波测试与分析

徐鸣洁¹, 钟 锴¹, 俞 缙¹, 李晓昭¹, 张 迪¹, 于 昊²

(1. 南京大学 地球科学系, 江苏 南京 210093; 2. 南京大学 物理系, 江苏 南京 210093)

摘要: 通过将声波测井及岩芯波速测量等方法运用于南京地铁工程勘察中, 利用声波测井结果与岩芯物性参数对比, 进行多参数综合分析, 为岩体风化程度与岩体强度变化分析提供了有效的参数。原位声波波速测量, 给出了岩体波速随深度的分布特征; 通过原位测井波速与室内岩芯波速的对比测量, 分析了不同强度岩石在不同测量条件下的差异; 对原位测井波形特征的振幅变化、衰减特性分析, 可进一步了解岩体的结构性质, 从而证明声波测井是工程地质勘察中一种快速、经济、有效的岩体原位测试方法。

关键词: 工程勘察; 声波; 波速; 岩体风化程度; 裂隙

中图分类号: U 231

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)06-1018-07

ACOUSTIC MEASUREMENT AND ANALYSIS IN NANJING SUBWAY ENGINEERING INVESTIGATION

XU Ming-jie¹, ZHONG Kai¹, YU Jin¹, LI Xiao-zhao¹, ZHANG Di¹, YU Hao²

(1. Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Acoustic logging and wave velocity measurement of borehole cores are applied to get some important information about rock characteristics in Nanjing subway engineering investigation. Based on the comparison of physical properties between acoustic logging and borehole cores, using the synthetical analysis of multi-parameter, much efficient information about rock weathering and strength is achieved. Using rock acoustic wave velocity of in-situ measurement, the distributing characteristic of the wave velocity of rocks in different depths are presented. Compared with the velocity measurement of well-logging and borehole cores, the disparities of rocks with different strengths on different measuring conditions, the amplitude variation, and attenuation characteristics of wave features of well-logging, are analyzed, and the structure properties of the rocks are discussed. It is proved that acoustic logging is a rapid, economic, and efficient method on in-situ measurement in geology engineering investigation.

Key words: engineering investigation; acoustic wave; wave velocity; rock weathering degree; fracture

1 引 言

南京地铁南北线一期工程全长 16.99 km, 其中地下线长 10.62 km, 沿线穿越不同的地层与地质构

造^[1]。声波测试工作主要在东井亭、鼓楼、小行 3 个测区, 它们位于南京地铁南北线一期工程的几个重要施工区段。

南京市地质概况为由三道基岩隆起分割成南北 2 个小盆地。在鼓楼站以南, 基岩主要包括白垩

收稿日期: 2003-10-04; 修回日期: 2003-11-27

作者简介: 徐鸣洁(1954-), 女, 1982 年毕业于北京大学地球物理专业, 现任副教授, 主要从事地球物理方面的教学与研究工作。E-mail: goxu@nju.edu.cn。

纪沉积岩，鼓楼站—珠江路站是上白垩统浦口组 (K_{2p}) 的砾岩，珠江路站以南是下白垩统葛村组 (K_{1g}) 的泥质粉砂岩、粉砂质泥岩。鼓楼站—许府巷站是紫红色安山岩及相应凝灰岩、火山角砾岩，属于上侏罗统龙王山组 (J_{3l})；玄武门站—南京站为灰黑色和灰绿色的闪长岩；小红山主要出露灰黄、灰白色闪长玢岩，风化严重；东井亭站—迈皋桥站为下侏罗统象山群 (J_{1-2x}) 的灰白色砂岩、石英砂岩，含长石偏多，夹有硅质页岩。地铁沿线所遇主要断裂为位于南京站—东井亭站的小红山断裂和位于鼓楼站区的鼓楼岗断裂(图 1)。

声波测试是通过声波在岩体中传播所反映的岩体运动学、动力学特征来获得岩体性质的信息。岩体波速是其运动学的最主要参数，常作为衡量岩体质量好坏、划分岩体风化带、了解岩体动弹性参数的主要指标与基本参量，能直观地反映地质因素和岩体特征^[2-4]。波速测量已被认为是一种评价岩体质量的可行方法，并提出了岩体的波速分级方法^[2,5]。

南京地铁工程勘察中声波测试工作主要采用一发双收的声波测井方法，测井 20 余口，另取岩芯 150 余块，在室内进行了岩芯波速、密度以及单轴抗压强度测量，试图对岩体进行多参数评价。

2 测量原理与分析方法

2.1 声波测井原理

测试中使用 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 μ s，探头为 30 kHz 的一发双收探

头。

一发双收测井原理示意图见图 2^[6]。井中探测部分由声波发射器 T 与接收器 R_1, R_2 组成，T 与地面上脉冲信号源连接， R_1, R_2 与记录装置相连。由 T 发射的声波脉冲经泥浆传到井壁，由于声波在泥浆中的波速 $V_{泥}$ 小于井壁岩层的波速 $V_{岩}$ ，故当声波以临界角方向射向井壁时，产生沿井壁滑行的折射波，再由井壁经泥浆传到接收器，由于 $V_{岩} \gg V_{泥}$ ，此折射波为初至波，由记录装置记录声波信号，可从信号中读出折射波旅行时间。令声波到达 R_1 和 R_2 的旅行时间分别为 t_1 和 t_2 ，测试用探头为 20 cm，有

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= \frac{AB}{V_{泥}} + \frac{BC}{V_{岩}} + \frac{CD}{V_{泥}} \\ t_2 &= \frac{AB}{V_{泥}} + \frac{BE}{V_{岩}} + \frac{EF}{V_{泥}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由于井径近似不变，于是 $CD = EF, \Delta L = BE - BC$ ，则

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{BE - BC}{V_{岩}} = \frac{\Delta L}{V_{岩}} \quad (2)$$

式中： ΔL 为 R_1 和 R_2 之间的距离，是一常数； Δt 为折射波到达两接收器的时间差。由此可获得岩层波速 $V_{岩}$ 为

$$V_{岩} = \frac{\Delta L}{\Delta t} \times 10^6 \quad (3)$$

这里， ΔL 以 m 为单位， Δt 以 μ s 为单位， $V_{岩}$ 以 $m \cdot s^{-1}$ 为单位。在一口井中多点测量，即可得到测井的波速曲线。

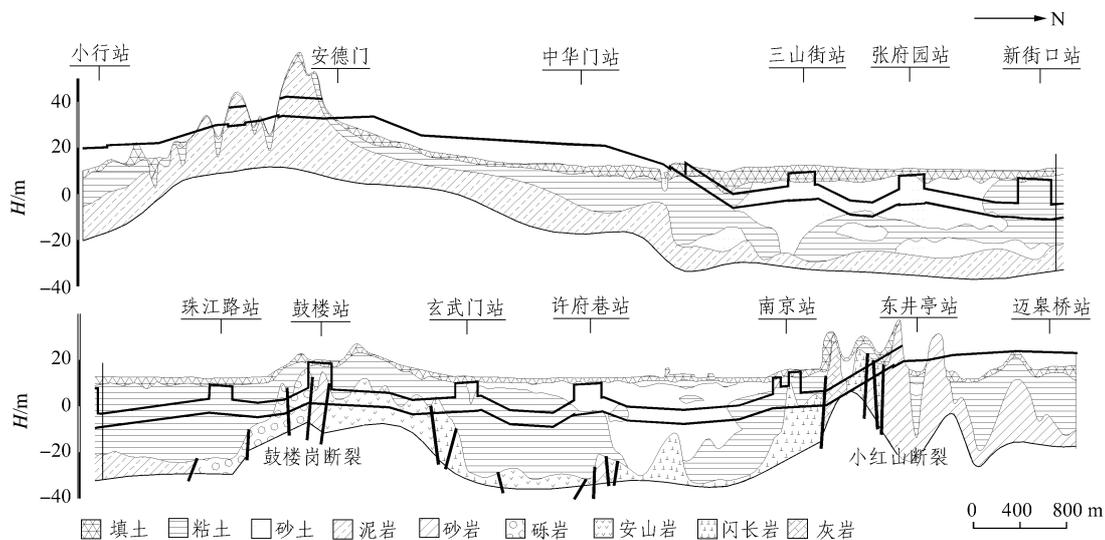


图 1 南京地铁工程地质剖面图^[1]

Fig.1 Geotechnical sections of Nanjing subway^[1]

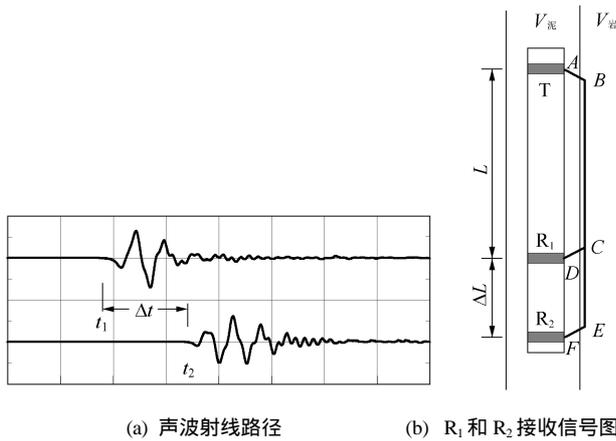


图2 一发双收测井原理示意图
Fig.2 Schematic plan of the acoustic logging

2.2 岩芯物性测量

对每口测量井取若干岩芯，其物理测量包括：

- (1) 用 DB4 多波参数分析仪测量常温、常压下岩芯的波速，测量用探头频率为 240 kHz，采样间隔为 0.1 μs，测量方式采用透射法；
- (2) 测量水饱和状态下岩石的密度；
- (3) 测量单轴抗压强度。

3 声波测井结果

3.1 鼓楼站区声波测井结果

XGZ6 测井位于鼓楼站区鼓楼岗断裂附近，孔深 27 m，其中，0~1 m 为杂填土，1~8.2 m 为粉质粘土，8.2~24.0 m 为强风化砂砾岩，24.0~27.0 m 为中风化砂砾岩。图 3(a)中 11~15 m 处波速很低，为 1 500~1 600 m/s，岩石受强烈风化，结构松散，岩芯在钻进时碎散，呈砂砾状，采样率为 16%~40%， $RQD = 0\%$ ；15~24 m 处波速为 3 000~3 500 m/s，此段岩石仍风化强烈，但采样率明显高于上部，达 33%~75%；24 m 以下波速为 3 500~3 900 m/s，岩石中等风化，采样率达 40%~80%。可见，岩芯波速与采样率、 RQD 有很强的相关性，在岩体风化程度较强，取芯较困难时，声波测井可提供与岩体质量直接相关的信息。

XGW2 测井(图 3(b))位于鼓楼站以北，孔深 35 m，其中，18.5~19.5 m 为强风化安山岩，波速较低，为 2 000~2 500 m/s。19.5~35.0 m 为中风化安山岩，波速特征明显分为 2 段：19.5~26.0 m 处波速为 2 900~3 300 m/s；26.0~35.0 m 处波速为 3 500~4 500 m/s，该段按波速特征又可划分为 3 个小段，26.0~28.0 m 处波速约为 4 000 m/s，28.0~31.0 m

处波速小于 4 000 m/s，31.0 m 以下，波速约为 4 000 m/s。可见，声波测井结果给出了直接反映岩体强度随深度分布的信息。

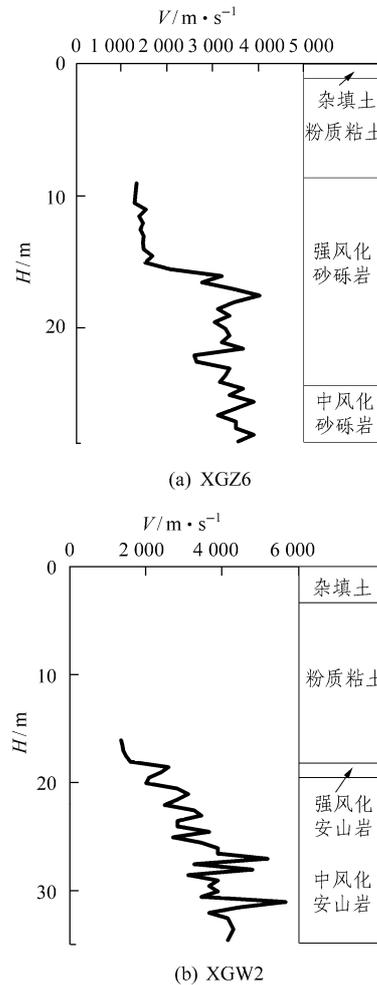


图3 鼓楼站区 XGZ6 和 XGW2 声波测井结果
Fig.3 Curves of wave velocities in XGZ6 borehole and XGW2 borehole

3.2 东井亭站(小红山)区声波测井结果

由图 4 可见，XND16 井中中风化砂岩波速为 3 500~4 000 m/s，强风化砂岩波速为 1 600 m/s 左右，与中风化砂岩呈明显的速度界面。在中风化砂岩中也存在不同的波速段。

3.3 小行站区声波测井结果

此区几口测井岩性变化不大，波速较低，为 2 000~3 000 m/s，且变化不明显，可以推断岩体风化程度变化不大，野外钻孔记录证明了这一点，岩性基本上是微风化泥质粉砂岩、粉砂质泥岩。从总体上看，此区波速低于以上两区，这主要是由于岩性不同造成的。

由图 5 可见：中风化泥质粉砂岩与中~微风化泥质粉砂岩的上部波速约为 2 000 m/s；中~微风化

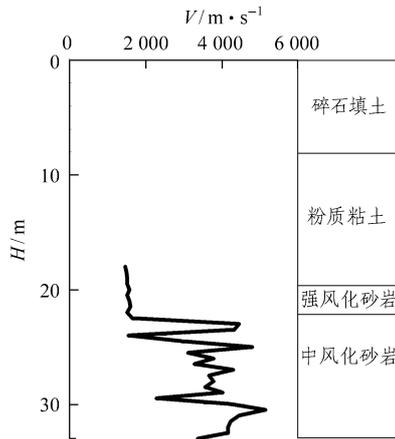


图 4 东井亭站(小红山)区 XND16 声波测井结果
Fig.4 Curve of wave velocity in XND16 borehole

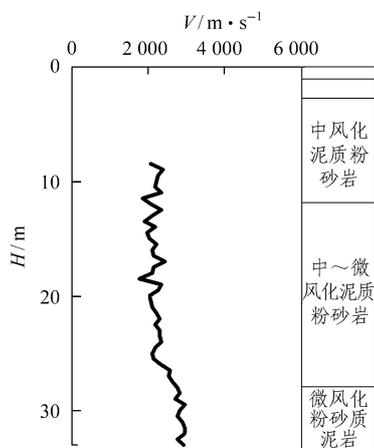


图 5 小行站区 XXA38 声波测井结果
Fig.5 Curve of wave velocity in XXA38 borehole

泥质粉砂岩的下部波速比上部略高；中~微风化泥质粉砂岩与微风化粉砂质泥岩分界处，波速有较明

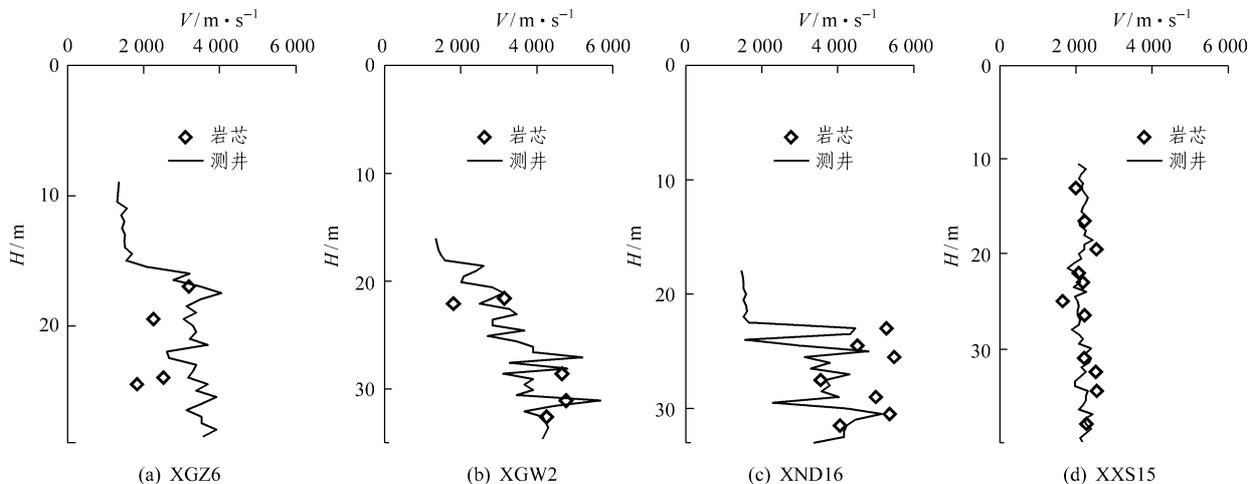


图 6 测井波速与岩芯波速对比图
Fig.6 Wave velocity contrasted in the borehole and core samples

显的变化，微风化粉砂质泥岩波速接近 3 000 m/s。

从声波测井曲线可见，测井波速不仅反映了岩性的变化，还反映了岩体的风化程度，特别是在采样率较低时，它可提供直接反映岩体性质的信息。

4 测井结果与岩芯物性参数对比分析

4.1 测井波速与岩芯波速对比

图 6 为测井波速与岩芯波速对比图。由图 6(b), (d)可见，测井波速与岩芯波速比较一致。但存在以下 2 种特殊现象：

(1) 当取芯段岩体完整性较好时，岩芯波速常大于测井波速(图 6(c))。这是由于声波测井测量时，声波由 T 经过孔中泥浆、井壁到达 R，波的传播路径较长，影响因素较多，因此测量结果具有平均性质；而岩芯测量是直接对完整岩芯测量的结果，因而在此情况下岩芯波速大于测井波速。

(2) 当取芯段岩体完整性较差时，岩芯波速常小于测井波速(图 6(a), 强风化砂砾岩)。这可能是由于卸荷扰动，使得岩石内部的裂隙容易张开，导致岩芯波速明显降低；而原位测井时岩体在围压作用下，因而测井波速大于岩芯波速。在不同围压的岩芯试验中，围压增加的初始阶段波速表现为快速的非线性增大；当围压为 100~200 MPa 时，波速呈线性增加，且增加速度减缓^[7]。因此对完整性较差的岩体，用原位测井波速进行岩体分级时必须考虑围压作用，适当加以修正。

4.2 物性参数综合对比

表 1 为 XGZ6, XND16, XXS15 三口测井岩芯物性参数测量结果, 并与测井波速对比。

其中, 动弹性模量 E_m 是利用岩芯的纵波波速 V_p 和密度 ρ 由下式计算而得, 即

$$E_m = V_p^2 \rho \frac{(1+n)(1-2n)}{(1-n)} \quad (4)$$

式中: n 为岩石泊松比, 其变化范围很小, 取 $n = 0.25$ 。

由表 1 可见: 裂隙对波速的影响很大, 波速不仅与裂隙的发育程度有关, 还与声波传播方向与裂隙间的倾角有关; 当裂隙倾角较缓(岩样波速测量方向与裂隙方向之间角度较大)时, 由于声波穿过裂隙软弱的充填物, 使岩芯波速明显降低, 造成岩芯波速小于岩体波速; 当岩芯存在高角度的裂隙时, 因

波速测量方向基本顺着裂隙方向, 波射线沿岩芯完好部分传播, 则波速测量值较高, 但单轴抗压强度较低, 如 XND16 钻孔中, XND16-T5 岩芯为中风化砂岩, 存在陡倾闭合裂隙, 此段岩芯采样率为 95%, 岩芯波速为 5 000 m/s, XND16-T6 岩芯中存在陡倾方解石脉填充, 采样率为 100%, 岩芯波速为 5 360 m/s, 单轴抗压强度较低, 分别为 11.84 和 5.24 MPa。

总之, 在 3 个区中, 小行站区为砂泥岩, 不仅波速低, 而且密度低, 单轴抗压强度低, 动弹性模量小, 岩性较软。

5 测井曲线波形特征分析

岩石介质对波的吸收作用引起波在传播过程中

表 1 测井岩芯物性参数测量结果

Table 1 Measurement results of physical properties for core samples

| 测井号 | 样品号 | 取样深度 /m | 测井波速 /m · s ⁻¹ | 岩芯波速 /m · s ⁻¹ | 岩芯测井波速差/m · s ⁻¹ | 岩石密度 /g · cm ⁻³ | 单轴抗压强度 /MPa | 动弹性模量 /GPa | 备注 |
|----------------|---------------|---------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------|------------|-----------------|
| XGZ6 (鼓楼) | 1 | 17.00 ~ 17.10 | 3 472 | 3 181 | - 291 | 2.52 | 28.09 | 21.24 | |
| | 2 | 19.50 ~ 19.60 | 3 048 | 2 248 | - 800 | 2.38 | 11.15 | 10.02 | 倾角 30 °~ 40 微张裂 |
| | 3 | 24.30 ~ 24.40 | 3 420 | 2 507 | - 913 | 2.50 | 31.91 | 13.09 | |
| | 4 | 24.60 ~ 24.80 | 3 527 | 1 817 | - 1 710 | 2.49 | 16.60 | 6.85 | |
| XND16 (东井亭) | T1 | 22.40 ~ 22.75 | 4 435 | 5 276 | 841 | 2.53 | 27.10 | 58.66 | |
| | T2 | 24.10 ~ 24.40 | 2 970 | 4 510 | 1 540 | 2.47 | 45.38 | 41.85 | |
| | T3 | 25.40 ~ 25.80 | 4 207 | 5 481 | 1 274 | 2.56 | 91.46 | 64.06 | |
| | T4 | 27.00 ~ 27.50 | 3 676 | 3 548 | - 128 | 2.47 | 5.72 | 25.90 | 2 组裂隙 |
| | T5 | 28.50 ~ 28.90 | 4 021 | 5 000 | 979 | 2.50 | 11.84 | 52.06 | |
| | T6 | 30.00 ~ 30.60 | 5 104 | 5 360 | 256 | 2.60 | 5.24 | 62.22 | 陡倾方解石脉填充 |
| | T7 | 31.10 ~ 31.60 | 4 237 | 4 055 | - 182 | 2.49 | 17.15 | 34.11 | 缓倾方解石脉填充 |
| XXS15 (小行) | 3 | 12.90 ~ 13.05 | 2 155 | 1 996 | - 169 | 2.31 | 0.77 | 7.67 | |
| | 4 | 16.25 ~ 16.40 | 2 178 | 2 233 | 55 | 2.25 | 0.47 | 9.35 | |
| | 5 | 19.80 ~ 20.00 | 2 158 | 2 540 | 382 | 2.31 | 0.39 | 12.41 | |
| | 6 | 21.50 ~ 21.60 | 1 786 | 2 075 | 289 | 2.26 | 0.47 | 8.11 | |
| | 7 | 23.00 ~ 23.30 | 2 118 | 2 185 | 67 | 2.19 | 0.47 | 8.71 | |
| | 8 | 25.00 ~ 25.20 | 2 049 | 1 649 | - 400 | 2.29 | 0.48 | 5.19 | |
| | 9 | 26.40 ~ 26.60 | 2 049 | 2 230 | 181 | 2.31 | 0.46 | 9.57 | |
| | 12 | 30.85 ~ 31.00 | 2 338 | 2 216 | - 122 | 2.28 | 0.50 | 9.33 | |
| 13 | 32.50 ~ 32.60 | 2 273 | 2 521 | 248 | 2.29 | 0.50 | 12.12 | | |
| 14 | 34.00 ~ 34.15 | 1 984 | 2 552 | 568 | 2.34 | 0.48 | 12.69 | | |
| 16 | 37.95 ~ 38.10 | 2 273 | 2 277 | 4 | 2.27 | 0.46 | 9.80 | | |

注: 部分数据引用俞 缙的硕士学位论文《岩石声波信号小波分析研究及其工程应用》。

能量衰减, 普遍认为, 这种衰减特性与介质内部的结构以及饱和度、孔隙度、渗透率等性质有关^[8-11], 在软弱、裂隙发育的岩层中波的衰减特性比波速更敏感。波的衰减在记录曲线上表现为波形的变化、振幅的衰减以及波频率的变化^[12-14]。

初至波形的振幅变化、频谱分析中高频信号振幅的衰减特征都反映了岩体的性质。为了进一步分析波动衰减特征, 进行了波形增宽因子的计算^[11], 同源相邻两道记录的走时 t 与初至波形上升时间 t 的关系为

$$t_1 = t_0 + \sum_i kt_{i1} \quad (5)$$

$$t_2 = t_0 + \sum_i kt_{i2} \quad (6)$$

式中: k 为增宽因子(无量纲), 反映衰减特性; t_0 为源点初至波形上升时间。由式(6)减去式(5), 并考虑测井的 2 次记录同源、且 2 条射线路径基本一致, 只在图 2 所示的 CE 段有差异, 则有

$$t_2 - t_1 = k(t_2 - t_1) \quad (7)$$

这样, 可通过测量时间数据分析岩体的吸收性质。

以鼓楼站区 XGZ6 测井为例, 测井记录两初至波振幅差(图 7(a))以及由上升时间估算的增宽因子(图 7(b))与波速结果(图 3(a))对比可知: 在强风化岩段(16~17.5 m 处)波的衰减较弱, 且在同一分类段内也有差异; 中风化岩中也可分为 2 段, 26~28 m 处初至波振幅衰减较明显, 但增宽因子变化不大, 可能是由于该段岩体中含较多硬质粗砾岩引起散射所致。

提取波形的动力学参数作为岩体性质分析的指标以及将原位测井曲线的衰减特征分析直接用于现场定量分析还需进一步地开展研究。

6 几点认识

(1) 声波测井通过对岩体原位波速的测量, 可获得钻孔中岩体波速的分布曲线, 进而可对岩体性质分层, 分析岩体的风化程度等。它是工程地质勘察中一种快速、经济、有效的岩体原位测试方法。

(2) 由于岩体波速与其强度有密切关系, 利用测井波速变化曲线可以直接提供岩体强度变化的较详细信息。特别是在岩体完整性较差、取芯困难时, 声波测井可提供有价值的信息和参数。

(3) 如能测量对应的岩芯波速、密度、单轴抗

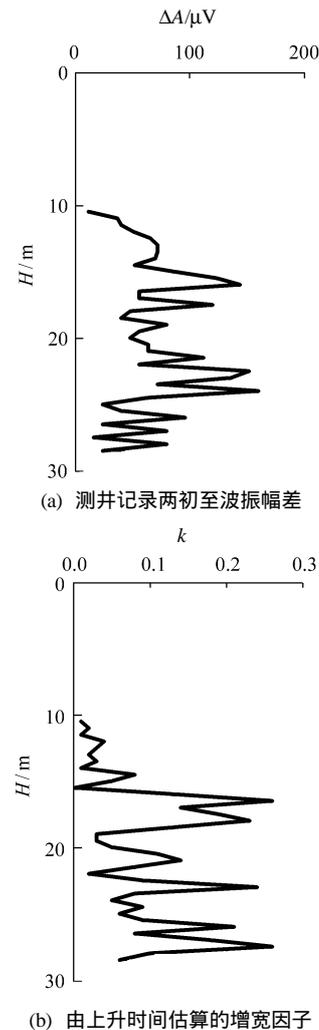


图 7 XGZ6 测井初至波形与衰减特性分析

Fig.7 Analysis of initial waveform and attenuation character of XGZ6

压强度等物性参数, 则可采用多参数综合分析, 获得更多、更确切的工程地质中需要的物理参数。

(4) 当所取岩芯段岩体完整性较差时, 岩芯由于卸荷扰动, 卸荷后由于内部裂隙容易张开, 导致岩芯波速值降低; 而声波测井是岩体在围压作用下测量的, 因此岩体波速大于岩芯波速。通过岩芯波速与测井波速对比, 可进一步分析岩体的风化程度, 但应注意在不同测试条件下岩体与岩芯波速的差异。当直接用原位测井波速进行岩体分级时必须考虑围压作用, 适当加以修正。

(5) 波的衰减性质对介质很敏感, 在对波形分析时, 提取其动力学参数作为岩体性质分析的指标是有很意义的, 但仍需进一步地开展研究。

参考文献(References):

- [1] 庄乾城, 罗国煜, 李晓昭等. 南京地铁稳定性优势面理论分析[J]. 高校地质学报, 2002, 8(4): 453-459. (Zhuang Qiancheng, Luo

- Guoyu, Li Xiaozhao, et al. Stability analysis of subway in Nanjing using preferred plane theory[J]. Geological Journal of China Universities, 2002, 8(4): 453–459.(in Chinese))
- [2] 赵明阶, 吴德伦. 工程岩体的超声波分类及强度预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 89–92.(Zhao Mingjie, Wu Delun. The ultrasonic identification of rock mass classification and rock mass strength prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 89–92.(in Chinese))
- [3] 朱焕春. 某高边坡岩体声波测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 378–381.(Zhu Huanchun. Sonic wave measuring and analysis of high rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4): 378–381.(in Chinese))
- [4] 席道瑛, 黄理兴. 岩芯声学特征与原位测井参数对比研究[J]. 岩土力学, 1995, 16(2): 52–56.(Xi Daoying, Huang Lixing. Study on the acoustic characteristics of rock samples and parameters of in-situ measurement comparative[J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, 16(2): 52–56.(in Chinese))
- [5] 王让甲. 声波岩石分级和岩石动弹性力学参数的分析研究[M]. 北京: 地质出版社, 1997.(Wang Rangjia. Research on Acoustic Classification and Elastic Parameters in Rock Mechanics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.(in Chinese))
- [6] 陈仲候, 王兴泰, 杜世汉. 工程与环境物探教程[M]. 北京: 地质出版社, 1993. 89–99.(Chen Zhonghou, Wang Xingtai, Du Shihan. Textbook of Geophysical Exploration in Engineering and Environment[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993. 89–99.(in Chinese))
- [7] 刘斌, 王宝善, 季卫国. 围岩作用下岩石样品中微裂纹的闭合[J]. 地球物理学报, 2001, 44(3): 421–428.(Liu Bin, Wang Baoshan, Ji Weiguo. Closure of microcracks in rock samples under confining pressure[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(3): 421–428.(in Chinese))
- [8] Best A I, Mehan C, Sothcott I The relationships between the velocities, attenuations, and petrophysical properties of reservoir sedimentary rocks[J]. Geophys. Prosp., 1994, 42(1): 151–178.
- [9] 刘斌, Kern H, Popp T. 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, Popp T. 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))
- [10] 岳兰秀, 谢鸿森, 周文戈. 高温高压弹性波衰减的研究综述[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 382–386.(Yue Lanxiu, Xie Hongsen, Zhou Wenge. Overview of seismic wave attenuation at high temperature and high pressure[J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(3): 382–386.(in Chinese))
- [11] 王辉, 常旭, 刘伊克等. 时间域相邻道地震波衰减成像研究[J]. 地球物理学报, 2001, 44(3): 397–403.(Wang Hui, Chang Xu, Liu Yike, et al. Seismic neighboring traces attenuation tomography in time domain[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(3): 397–403.(in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 钟锴, 徐鸣洁, 王宏等. 岩样中孔隙、裂缝声波特征的试验研究[J]. 石油试验地质, 2002, 24(2): 164–167.(Zhong Kai, Xu Mingjie, Wang Hong, et al. An experiment study on the acoustic characteristics of pores and fractures in rock samples[J]. Experimental Petroleum Geology, 2002, 24(2): 164–167.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组. 工程岩体试验方法标准(GB/T50266–99)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.(The National Standard Compilation Group of People's Republic of China. Experimental Standard of Rock Mass in Engineering (GB/T50266–99)[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.(in Chinese))