

声波全波列测井技术在岩土工程中的应用

贾保江

廊坊市中铁物探勘察有限公司 河北 廊坊 065000

【摘要】用全波列测井得到的时间深度剖面提取声速测井曲线，不仅使声速测井便于解释，而且使测试结果更加准确可靠；进一步改进声波仪软硬件将使其功能更完备。

【关键词】声波全波列测井；折射纵波；斯通利波；综合解释；应用实例

声波全波列测井既可以测得折射纵波和折射横波，而且还可以测得折射波之后的假瑞利波、斯通利波及反射波等组成的后续波。与体波（折射纵波和折射横波）一样，后续波中的斯通利波也携带了丰富的地层信息。理论和实验结果均表明，斯通利波可以有效识别钻井穿过岩土分层界面和地层构造（裂缝、破碎带等）、划分岩石风化程度、确定软弱夹层及井旁一定范围内的地质异常体。

本文以西气东输中段三线管道工程某标段工程勘察项目为例，合理调整声速测井采样参数后测得的声波全波列时间-深度剖面，通过分析其中的井孔中斯通利波在岩体内部声场特征，结合折射纵波声学参数，使声速测井工作更简便直观、结果更准确客观。

1 井中的声场特征

在钻井中，由单极子声源激发的全波列形是由多种波列组成的，主要有折射纵波、折射横波、假瑞利波和斯通利波等。

1.1 折射纵波

折射纵波是由声源发出的以第一临界角入射到井壁后，在井周地层并靠近井壁且以地层中的纵波速度沿井壁折射的波。这种波在沿井壁传播的同时，又以第一临界角为折射角折回井中，被接收传感器接收并记录。由于一般岩石的纵波速度远高于井液的波速，钻井测得的全波列中折射纵波作为首波先于其它波到达接收探头，其频率高、幅值最小；当仪器性能较差或测试条件不稳定时，易受到噪声干扰而畸变，给正确识别其起跳点带来一定的困难。

1.2 折射横波

折射横波也是体波，从射线声学的角度看，横波头波是由声源发出且以第二临界角入射到井壁后，在井周

地层并靠近井壁以地层中的横波速度传播，这种波在沿井壁传播时又会以第二临界角为折射角折回井中，被接收传感器接收并记录。

1.3 假瑞利波

假瑞利波是以相速度介于井内流体中的纵波速度和地层中的横波速度传播的无几何衰减的高频散波。

1.4 斯通利波

斯通利波是一种低频散的导波，其速度略低于井液声波，不存在几何衰减，在全波列各组分波中频率最低（主要集中在5kHz以下），能量较高（一般情况下是折射纵波能量的上百倍），到达时间较晚，相速度介于0.89~0.96倍井液波速；记录长度足够时，不仅可记录斯通利直达波，还可记录到因井壁声学阻抗变化而形成的斯通利发射波。

2 声波全波列测井系统及工作原理

2.1 声波全波列测井系统

测井系统由主机、井下全波列声系、测井电缆和数据处理软件组成。主要技术指标见表1。

表1 测井系统主要技术指标

项目	技术指标	项目	技术指标
通道数	2道	采样点数	512 ~ 32768
频带	10Hz ~ 200kHz	发射电压	600、1000V
采样间隔	0.1us ~ 499us, 可调	增益	0.01 ~ 8000倍
声系·发射主频	20kHz	声系·源距、间距	0.3m、0.2m

2.2 折射纵波工作原理

一发双收声系的发射探头在井液中发出无指向性声波，以不同的角度辐射到井壁上，当入射角为第一临界角时，在井壁上产生折射纵波；折射纵波在传播过程中又以90°为入射角不断折射回井液，并被接收传感器拾取，形成振动曲线。当井壁围岩波速大于井液波速时，折射纵波将作为头波被由近及远的接收探头所接收，

根据两曲线初至时间差可计算出其间岩层的波速值。

2.3 斯通利波工作原理

测井时, 由于传播的声场中有横波分量, 井壁表面将有垂直于井轴方向的位移, 使井液中的质点产生垂直于井轴方向的运动, 井液中质点的运动不再是沿井轴的单一方向, 而是沿井轴方向和垂直于井轴方向的两种运动的合成。此时, 井液中传播的“直达波”不再是纯纵波, 而是速度低于井液纵波速度的“井眼斯通利波”。

斯通利波在均匀的流体-固体介质中不具有频散性, 但在井中, 由于实际介质的不均匀性, 斯通利波具有频散现象。在“快速”地层中斯通利波频散不是太严重, 以大约 0.9 倍的井液波速传播, 而且在“快速”地层中, 斯通利波的频散性质和传播特性与地层性质关系较小。但在“慢速”地层中, 斯通利波的频散要比“快速”地层严重的多, 并且它对地层横波速度非常敏感, 对地层性质也比较敏感。

斯通利波在井液中传播时, 如果遇到井径改变或井壁介质阻抗变化(如裂缝、软弱层等)将引起不同程度斯通利波透射和反射现象, 据此可以确定其阻抗($Z = \rho c$)相对大小及深度:

(1) 岩层阻抗相对大小

斯通利直达波由阻抗低的岩层进入阻抗高的岩层将产生与直达波相位相同的反射波, 由阻抗高的岩层进入阻抗低的岩层将产生与直达波相位相反的反射波。

(2) 岩层阻抗变化深度

在全波列时间-深度垂直剖面中, 同一阻抗变化界面形成与井轴(或斯通利直达波)斜交的闭口或开口的“V”字形倾斜斯通利反射波组, 倾斜波组斜率倒数的一半为斯通利波波速。阻抗变化深度的简单算法如下:

方法 1: 读取两个或两个以上不同深度的上行(下行)斯通利反射波初至时间, 对深度和初至时间进行线性回归, 其在深度轴上的截距即为阻抗变化深度;

方法 2: 读取某一深度曲线上斯通利反射波初至时间, 斯通利波速度与初至时间的一半之积即为阻抗变化位置距该深度的距离, 然后进行声系源距修正, 修正后的值即为阻抗变化位置的深度。

直接用斯通利直达波幅值衰减曲线确定异常体的轴向尺寸是错误的, 必须进行声系修正。

2.4 折射纵波和斯通利波性能对比

表 2 为声速测井和全波列测井斯通利波对井壁介质的地球物理特征相关性描述。

由表 2 可见, 折射纵波与斯通利波在波速上整体表

表 2 折射纵波和斯通利波对井壁岩土分层的地球物理特征

井壁岩土分类	折射纵波特征	斯通利波特征 ^[3]
新鲜完整基岩	1. 波速高、波幅大、频率高; 2. 波速、波幅、频率值变化范围小	1. 直达波速度高、能量强; 2. 顶界面和底界面的反射波组在本层内能量强、斜率大, 并有多次反射, 顶界面和底界面形成的反射波无能量消散现象; 3. 层内无其它反射波
风化完整基岩	随着岩体风化程度提高, 波速、波幅、频率降低程度逐渐增大; 波速、波幅、频率值变化范围较小	1. 直达波速度和能量均较新鲜完整基岩降低; 2. 顶界面和底界面反射波组在本层内能量及斜率均有降低, 顶界面和底界面反射波能量有削弱现象; 3. 层内无明显其它反射波
岩体破碎、节理裂隙发育	节理裂隙处声学参数均有明显降低或减小; 声速曲线变化幅度大或呈锯齿状或跳跃状, 波形畸变严重, 波速高值与低值交替出现, 但波速平均值较低, 从而出现声速“低值异常”带	1. 直达波速度高、能量较强; 2. 顶界面和底界面反射波组在层内可见, 能量强、斜率大, 并可能有多次反射波; 3. 层内存在多组“V”字形层内反射波, 层内反射波能量低、频率高
软弱岩层	当岩层纵波速度大于井液波速时, 波速低; 否则无法测得井壁介质纵波波速	1. 直达波速度变低、波组向下弯曲, 能量很弱或不可见; 2. 顶界面和底界面反射波组向外的一支能量强、频率低, 向内的支能量弱、频率低、速度低; 顶界面和底界面以外的反射波组穿过本层顶、底界面进入本层后, 能量突然变低、频率低、速度低(斜率发生改变)
土层	无法测得井壁介质纵波波速	1. 直达波速度低, 波组到达时间长、能量微弱; 2. 无反射波穿过本层

现一致；在波幅上，折射纵波波幅受外界影响比较大，其数值一般在几十毫伏以下，而斯通利直达波幅值受外界影响很小，其数值一般在一千几百毫伏之上；而斯通利反射波在井壁阻抗变化时，不仅可以确定其深度，亦可根据相位确定阻抗的相对变化。

2.5 应用实例

在西气东输三线中段某隧道工程勘察项目中，作者在对 SN3ZK2 钻井进行声速测井时采用了全波列测井采集参数（主要参数：采样点数 16k，频带范围 10Hz ~ 30kHz，采用间隔 1us），这样不仅可以准确采集到折射纵波，还可采集到斯通利直达波和斯通利反射波等波形。测得全波列 - 深度波形图见图 1。

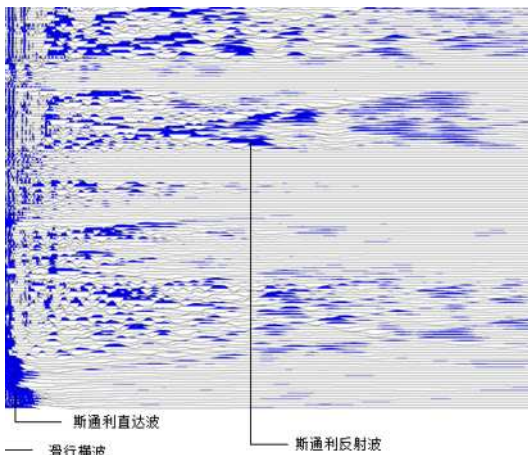


图 1 SN3ZK2 全波列 - 深度波形图

图 2 为依据折射纵波与斯通利波地球物理特征对测试钻孔进行的地质解释。

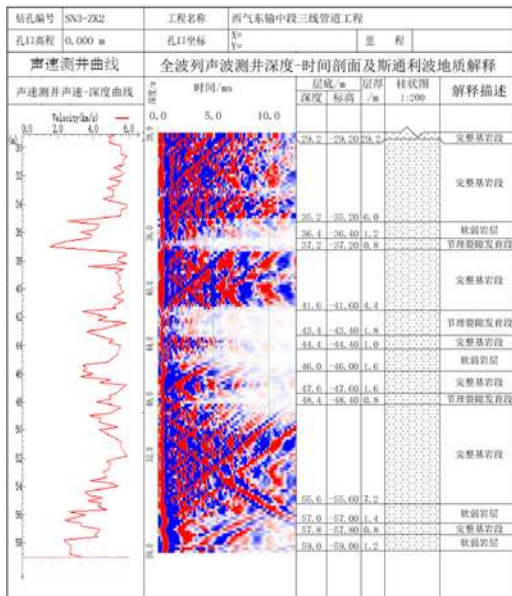


图 2 折射纵波与斯通利波地球物理特征综合地质解释
由图 2 可见，折射纵波与斯通利波对岩层弹性力学

物理特征一致，在分析时可互相印证，与现场芯样的裂隙、风化程度、岩性变化位置等标志层吻合度非常高。

3 结束语

通过适当调整声速测井参数即可获得全波列测井时间深度剖面，应用实例表明：

- (1) 利用全波列测井中的斯通利波可以区分岩性，定性确定岩体完整程度，划分裂隙发育区或破碎带，校正钻探分层，弥补钻芯法不足井段的地质资料；
- (2) 综合利用斯通利波和声速测井技术与钻探技术相结合对围岩进行分级，可以相互取长补短，使岩体的定量评价与定性描述结合起来，是一种很有前途的评价方法；
- (3) 运用折射纵波和斯通利波声学特征，不仅可以使声速测井便于解释、快速排除二义性，而且使测试结果准确，可靠度大幅提高；
- (4) 进一步完善和改进声波仪软硬件，可以使其功能更完备，对全波列测井在岩土工程中的广泛应用具有积极的推动作用。

【参考文献】

[1] 章成广. 声波测井原理及应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
 [2] 何涛等. 斯通利波在测井应用中的研究进展和现状 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2002, 38(4).
 [3] 《工程地质手册》编委会. 管波探测 [M]. 工程地质手册 (第五版), 第二篇, 第五章, 第六节, 2018.