第八章 声波测井（16 学时）

声波在不同介质中传播，速度有很大差别，而且声波幅度的衰减、频率的变化等声学特性也是不同的。声波测井就是利用岩石等介质的这些声学特性来研究钻井地质剖面、判断固井质量等问题的一种测井方法。

声波是近年来发展较快的一种测井方法。由最早的声速测井、声幅测井发展到后来的长源距声波测井，变密度测井、井下声波电视 BHTV、噪声测井到现在的多极子阵列声波测井（包括偶极子横波成像仪 DSI），如井周声波成像测井 CBIL，超声波井眼成像仪等。特别是声波测井与地震勘探的观测资料结合起来，在解决地下地顶构造，判断岩性，识别压力异常层位，探测和评价裂缝，判断储集层中流体的性质方面，使声波测井成为结合测井和物探的纽带，有着良好的发展前景。

第一节　岩石的声学特性

声波是物质的一种运动形式，它由物质的机械振动产生，通过质点间的相互作用将振动由近及远的传播，而质点与质点有弹性相互联系着。所以声波在物质中的传播与其弹性密切相关。

一．岩石的弹性

博客石油
www.bocgou.com

受外力作用发生形变，外力取消后，恢复到原来状态的物体叫弹性体。而当外力取消后不能恢复其原始状态的物体叫塑性体。一个物体是弹性体还是塑性体，不仅和物体本身的性质有关，而且和物体所处的环境有关（温度，压力等）及外力的特点（外力作用形式，时间和大小）有关。一般说外力小作用时间短，物体表现为弹性体。

声波测井发射的声波能量小，作用在岩石上的时间也短，所以对声波测井来讲，岩石可看作弹性体。因此研究声波在岩石中的传播规律，可以应用弹性波在物质中的传播规律。

可用杨氏模量（纵向伸长系数），泊松比和拉梅系数等物理量来描述物质的弹性。

二．岩石的声波速度

声波在介质中传播，传播方向和质点振动方向相互一致的称为纵波，而传播方向与质点振动方向相互垂直的称为横波。纵波和横波的传播速度 v_p, v_s 与弹性参数有如下关系：

$$V_p=\sqrt{\frac{E}{\rho}\cdot\frac{(1-\sigma)}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}}=\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

$$V_s=\sqrt{\frac{E}{\rho}\cdot\frac{1}{2(1+\sigma)}}$$

E: 杨氏模量　　σ：泊松比　　ρ：物质密度　　λ,μ ：拉梅系数

同一介质中，$\frac{v_p}{v_s}=\sqrt{\frac{2(1-\sigma)}{1-2\sigma}}$

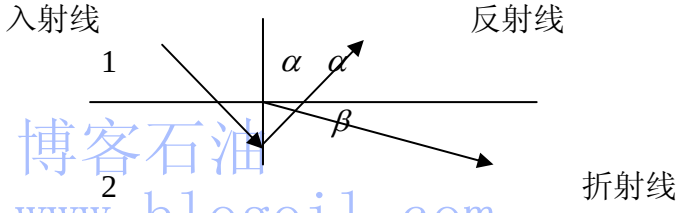
由于大多数岩石的泊松比为 0.25,所以在岩石中的纵横波速度之比约为 1.73。由（1）式知道声波速度随岩石的弹性加大而增大，但不会随岩石密度的加大而减小，因为 E 和ρ还有关系，并且随着ρ的增大，E 有更高级次的增大，所以ρ增大，岩石的声速是增大的。

对沉积岩来说，声速除与上述基本因素有关外，还与岩性，岩石的结构及地层的埋藏深度，地质时代有关。

三、岩石的声波幅度

声波在岩石中传播，能量（与幅度的平方成正比）会发生衰减，一是因为内摩擦原因造成热能损失而产生的衰减，一是由于波前扩展或界面反射造成的声能衰减。前者衰减的大小和岩石的密度以及声波的频率有关。密度小声速低，声能衰减大，声波幅度低（声波频率高，声波幅度衰减大）。所以通过声波幅度的衰减可以了解岩层的特点或固井质量。

声波由一种介质向另一种介质传播，在两种介质形成的界面上，将发生声波的反射和折射，如土图所示：



博客石油
www.blogoil.com

入射波能量一部分被界面反射，另一部分透过界面在第二介质中传播。反射波的幅度取决于两种介质的声阻抗。所谓声阻抗（z）就是介质密度和声波在该介质中传播速度的乘积。

$Z=\rho .v$

两种介质的声阻抗之比z_1/z_2叫声耦合率。介质 1 和介质 2 声阻抗差越大，声耦合率越差，声能量就不易从介质 1 传到介质 2 中去。通过界面在介质 2 中传播的折射波的能量就越小。如果两介质声阻抗相近，声耦合的好，声波几乎都形成折射波通过界面在介质 2 中传播。这时反射波的能量就非常小。

第二节　声波速度测井

声波在声阻抗不同的两种介质的界面上传播时发生的折射和反射符合Snell定律，即反射和折射定律，折射定律可表示为：$\sin a/\sin\beta=v_1/v_2$，　v_1,v_2分别为介质 1 和介质 2 的声波速度。

因为v_1, v_2对一定的介质是固定值，所以随着入射角α增大，折射角β增大，在$v_2>v_1$的条件下，当α大到某一角度时,β为直角，此时折射波将沿着界面在介质 2 中传播，这样的折射波在声波测井中叫滑行波，或称为首波或头波，此时的入射角叫临界角，以i表示,其值为$\sin i=v_1/v_2$

声波从介质 1 向介质 2 传播，只要$v_1<v_2$ ，且α大于或等于临界角,就会产生滑行波.声速就是测量滑行波穿越地层 1m所用的时间,即时差。单位是us/m。

声速测井的下井仪器包括三部分。声系（由发射探头和接收探头组成），电子线路及隔声体，其中声系是主体。

一、声系及时差的记录。

声系的发射探头和接收探头，即换能器，是由压电陶瓷晶体制成，利用这种晶体具有的压电效应的物理性质，以其反效应发生声波，以其正效应接收声波。

1、单发单收声系及单发双收声系

对于单发单收声系，如图，由T和R_1组成发射和接收探头，源距为L，假设井内流体中纵波速度为v_1,井外地层的纵波速度为v_c，则第一临界角的正弦为 v_1/v_c，声波到达接及探头R_1的路径为$TABR_1$，所用时间为：

$$T_1=2TA/v_1+AB/v_c \quad \text{.....(1)}$$

$$=2a/v_1\cos i+(L-2a\,\mathrm{tg}i)/v_c$$

所以要做反演计算求v_c。必须已知v_1和井径a。但实际测井中，这两个参数是未知的或比较难确定的。所以单发单收声系不利于进行声速测量，一般采用单发双收。如图，声系由T, R_1, R_2,两个接收探头组成。R_1,R_2间的距离为L_d(间距)

同样，声波由T到R_2的传播时间为

$$T_2=2TA/v_1+AC/v_c \quad \text{.....(2)}$$

由（1）,(2) 得 $\Delta T=T_2-T_1=BC/v_c=L_d/v_c$

所以地层中纵波的时差为：

$$\Delta t_c=1/v_c=\Delta T/L_d$$

博客石油
www.blogoil.com

其中L_d是以知的，ΔT是实际记录的远近接收探头所接收到的滑行波的到达时间差。

两接收探头间的间距L_d的选择应考虑以下问题。如果L_d的过大，则所求得的纵波时差是长度为一个间距厚度的地层声速平均效应的贡献，因此不利于薄层分析，而且L_d过大，第二个接收探头由于地层的衰减而记录的滑行纵波幅度很小，不易辨认，易产生记录误差。另一方面，L_d选择过小，则被测量的声波时差的绝对值变小。在地面仪器的精度一定的情况下，则相对误差增大。因此从提高测量精度的角度来看，L_d选择大一些为好。如果地层的纵波速度比较低时，可以选择较小的L_d，这样可以提高薄层的分层能力。

单发双收存在的缺陷：

(1) 在井眼比较规则的时候能够测量记录井壁上随深度变化的时差，而且测量结果不受井内泥浆的影响，但如果井眼不规则，测量结果会受井内泥浆声速的影响，且误差较大。

(2) 单发双收声系存在深度误差。我们规定单发双收声系的记录点为两接收探头的中点。它记录的结果应该是在该记录点附近厚度为L_d的岩层的声速平均值，但实际情况并不是这样。声波在两个接收探头之间传播的距离并不和它们所对应的地层完全重合。这一深度误差在地层速度较高，井径较小时并不大，可忽略，但当地层v_c与v_1相差不大，且井径增大时，如在疏松的泥岩段，井壁坍塌，发生井径扩大，且第一临界角比较大，这一误差可打 0.5m，因此，深度误差必须考虑。（阵列声波测井仪器源距和间距可有多种选择）。

一、双发双收声系

为了消除深度误差及井径不规则所引起的误差。人们一般利用双发双收声系。其电极系结构如图所示。

它由两个发射探头R_1, R_2组成，R_1, R_2中间，T_1和T_2交替发射声波脉冲，由R_1, R_2各记录一次，然后将两次记录的时差求平均值，作为当前R_1, R_2对应的地层的声波时差。下面来分析双发双收声系是怎样减小或消除深度误差和井眼不规则的影响的。

1、双发双收声系的记录点o位于R_1, R_2的中点。当T_1工作时，反映的是B_1C_1段（中点为O_1）地层的时差平均值。当T_2工作时，反映的是B_2C_2段（中点为O_2） 地层的时差平均值。一般认为当R_1,R_2附近的地层岩性没有发生突变时，$i_1=i_2$,$a_1=a_2$,因此取两次测量结果的平均值反映的是O_1和O_2中点处的时差平均值。实际记录点为O_1和O_2的中点，此时实际记录点和仪器记录点重合，不再发生深度误差。

2、井眼补偿

T_1发射时，声波到达R_1、R_2的时间分别为

$$t_{11}=\frac{B_1A_1}{v_c}+\frac{T_1A_1+R_1B_1}{v_1}\text{，}\quad t_{12}=\frac{C_1A_1}{v_c}+\frac{T_1A_1+C_1R_2}{v_1}$$

$$\Delta t_1=t_{12}-t_{11}=\frac{B_1C_1}{v_c}+\frac{R_2C_1-R_1B_1}{v_1}$$

其中，v_c为地层的纵波声速，v_1为井眼流体的纵波声速，B_1C_1为两接收器的间距。

博客石油
www.blogoil.com

同理，当T_2发射声波脉冲时，$\Delta t_2=t_{21}-t_{22}=\frac{B_2C_2}{v_c}+\frac{R_1C_2-R_2B_2}{v_1}$，$B_2C_2$也为$R_1R_2$的间距。

在实际情况中，可近似认为$R_1B_1=R_1C_2$，$R_2B_2=R_2C_1$。所以取平均时差时：

$$\Delta t=\frac{\Delta t_1+\Delta t_2}{2}=\frac{B_1C_1+B_2C_2}{2v_c}=\frac{L_d}{2v_c}$$

这样就补偿掉了井眼不规则的影响。另外，双发双收声系还可克服仪器倾斜的影响。

双发双收声系的缺点是薄层分辨能力差，不如单发双收声系。另外还会产生盲区现象。画图加以说明（主要是滑行波在传播时必须是以一定的倾斜角入射到井壁上时才能产生，特别是低速地层和大井径的井眼，由于临界角大，这些现象更明显。）

三、声速测井的误差

1、要想测量到纵波时差，必须满足最小源距$L_{\min}=2atg\theta_c$，θ_c为第一临界角。

这是因为井内泥浆中也传播纵波，它不经过地层传播而直接被接收器接收到，而滑行波虽然主要在井壁上传播，传播速度大于井内泥浆中的声波，但它也在井内泥浆中传播一段距离，所以要保证滑行纵波最先到达，必须使源距$L>L_{\min}$，为了减小记录误差，尽量让滑行纵波与泥浆直达波分离应适当加大源

距。另外，为测量记录滑行横波或其它波群，因各种波型成分传播速度不一致，为让波群在时域内“拉开”，而尽量减少相互迭加。一般选择更长的源距。长源距声波测井就是利用这一原理来进行全波列测井的。

2、实际测井中，由于远、近接收探头所接收的滑行纵波的传播路径不一致，且声波在传播过程中会产生几何衰减和岩石吸收衰减，所以远、近接收探头记录到滑行纵波的幅度和波形可能会发生改变。一般而言，远接收探头接收到的信号的幅度要比近接收探头接收到的声信号要小。因而记录时会出现误差，为克服或消除记录误差。一般采用提高井下声波的中心频率，采用数字记录的方法。

四、影响声速测井的几个因素

1、井径的影响。扩径段声波时差减小，使时差曲线出现假异常。

2、层厚的影响。声速测井仪对小于间距的薄地层分辨能力较差。减小间距可以提高对于薄层的分辨能力，但是记录精度就受影响了，特别是探测深度也随之变浅。

3、周波跳跃的影响

正常情况下，声速测井仪的两个接收探头是被同一脉冲首波触发的，但在含气疏松地层中，由于能量的严重衰减致使首波减弱到只能触发第一接收探头而不能触发第二接收探头的情况下，第二接收探头为后续波所触发时，则会出现测井曲线上的急剧偏转或特别大的时差值，这种现象称为周波跳跃。

含气的疏松砂岩、裂缝发育的地层以及泥浆气侵的井段，由于声能量的严重衰减，经常出现周波跳跃现象。所以周波跳跃是疏松砂岩气层和裂缝发育地层的一个特征，可被利用来寻找气层或裂缝带。

博客石油
www.blogoil.com

五、速度测井的应用

1、声波测井曲线

声波测井曲线是声速测井仪测量到的声波时差随深度变化的关系曲线，对于比较理想的地层，如厚的泥岩夹有砂岩薄层的情况，曲线如图。

声波曲线的特点：

①当目的层上下围岩声波时差一致时，曲线对称于地层中点。

②岩层界面位于时差曲线半幅点

③在界面上下一段距离上，测量时差是围岩和目的层时差的加权平均效应，既不能反映目的层时差，也不能反映围岩时差。

④当目的层足够厚且大于间距时，测量时差的曲线对应地层中心处一小段的平均读值是目的层时差。

2、曲线的应用

①划分地层。不同岩性的地层时差值不一样，据此可划分地层

②判断气层。气层的时差值比含油含水层的要高得多，另外，在含气层段，声波时差往往会产生周波跳跃，在岩性一定的情况下，可用这一现象来指示气层。

③估算地层的孔隙度

$$\Delta t = (1-\varphi)\Delta t_{ma} + \varphi \Delta t_f$$

当岩石骨架时差 Δt_{ma} 和孔隙流体时差 Δt_f 已知时，利用时差曲线的读数 Δt 可求出地层孔隙度 φ 。

第三节　声波幅度测井

声波在介质中传播，其幅度会逐渐衰减，声波幅度的衰减在声波频率一定的情况下，是和介质的密度、弹性等因素有关的。声波幅度测井就是通过测量声波幅度的衰减变化来认识地层特点以及水泥胶结情况的一种测井方法。

一、水泥胶结测井(CBL)

在下套管的井中注水泥后，套管与井壁之间的环形空间内应充满注入的水泥。如果固井质量不好，套管与井壁之间的环形空间会残留泥浆。为了检查水泥与套管是否胶结良好，因此提出了水泥胶结测井。

CBL 采用单发单收声系，如图所示，源距为 3ft(0.91m)。发射器发射出声波后，一部分声波在套管中以滑行波的方式沿套管传播，形成套管波，另一部分会产生折射传到水泥环中传播，还有一部分穿过水泥环传入地层，分别形成水泥环波、地层波。

CBL 测量的是套管波的幅度。由于传播的路径和穿过的介质基本固定，因此波的衰减与介质的吸收及不同介质的界面上的反射系数有关。如果水泥环与套管外壁胶结好，由于水泥环的声阻抗与套管的差别小，声波传入水泥环，套管波的首波幅度低。如果水泥环与套管胶结不好，其中残留有泥浆，致使两者的声阻抗差别大，反射系数大，大部分声波能量沿套管传播，套管波的首波幅度大。如果套管外只有泥浆或空气时，套管波首波幅度与胶结好的首波相比，其幅度可增加 4～5 倍，因此可根据 CBL 测得的声波幅度曲线来判断水泥固井质量的好坏。

根据模拟井实验表明，可用声波相对幅度的大小来判断固井质量：

$$\text{声波相对幅度}=\frac{A_{\text{目的}}}{A_{\text{泥浆}}}\times 100\%$$

博客石油
www.blogoil.com

$A_{\text{目的}}$：目的层井段的声波幅度。

$A_{\text{泥浆}}$：套管外全是泥浆的井段的声波幅度。

通常，相对幅度越小，固井质量越好；反之相对幅度越大，固井质量越差。根据实验结果和实际经验，可将固井质量划分为三个等级：

①胶结质量良好，相对幅度<20%

②胶结质量中等，相对幅度介于 20%～40%

③胶结质量不好，相对幅度>40%

CBL 测量的是套管波的首波幅度。首波幅度的大小主要取决于水泥与套管外壁的胶结程度，因此只能解决第一界面（套管外壁与水泥环的界面）的问题，而水泥环与井壁（水泥环与地层）之间是否胶结良好，即第二界面的问题是无法解决的。但由于水泥胶结测井方法简单，易于解释，仍然是判断固井质量的常用方法。

二、变密度测井(VDL)

为了更好地检查下套管井第一界面、第二界面的胶结程度，提出了变密度测井。变密度测井采用单发单收声系，源距为 5ft(1.52m)，实际上为声波波列测井，可以接收到套管波、水泥环波及地层波。

1、变密度测井测量原理

VDL 利用单发单收声系进行全波列测量，在 1*ms* 的时间间隔内，能够测量套管波、水泥环波，地层波等。在测量市把信号幅度的正半周保留，将负半周去掉，

正半周的信号输入到调辉管，将声波幅度的大小转变为光辉度的强弱，信号为零幅度时用灰色表示，正幅度用黑色表示，黑色的深浅表示信号幅度的大小；负半周用白色表示，在照相记录仪上就显示出随深度变化的黑、白相间的条纹，即显示为声波信号的强度—时间记录。

2、曲线分析

当套管外无水泥，只有泥浆时，此时第一界面声耦合不好，致使大部分声能量沿套管传播，极小部分传到地层，甚至传不到地层，这是套管波的幅度很大，而地层波的幅度很小，甚至看不到地层波（图 a）。当水泥环与套管及地层胶结良好时，声耦合好，声波能量基本上传到地层，此时套管波幅度小，而地层波的幅度较大（图 b）。当第一界面胶结良好，而水泥环与地层胶结不好时，声波大部分能量传到水泥环中，由于水泥环吸收强，致使声波幅度明显衰减，此时所有波的幅度都很低（图 c）。当套管偏斜时，一侧与水泥胶结良好，而另一部分与没有水泥，地层称为窜槽，声波能量一部分沿套管传播，另一部分传入地层，此时既有地层波的显示，也有套管波的显示。

另外，在 VDL 测井图（辉度图）中，套管接箍也有显示，显示出“人字形”的条纹线。

CBL或VDL是反映套管周围水泥胶结的平均状况，不能反映套管周围不同方位的水泥胶结状况，近年来又发明了研究套管周围 360^0方位的水泥胶结情况的测井方法，称为分区水泥胶结测井（SBT，阿特拉斯）。该仪器有 6 个推靠滑板，每个滑板上装有一个发射器和一个接收器，相邻两滑板之间的夹角为 60^0。测井时推靠器使滑板贴在套管壁上，每个接收器接收相邻滑板上发射器发射的声波，这样就可以测出 6 条声幅曲线，每条曲线显示 60^0张开角内水泥的胶结状况，这样就可以显示套管周围不同方位处水泥的胶结情况，进一步提高检查固井质量的精度。该仪器已投入工业性的应用，取得了较好的使用效果。

博客石油
www.bloggoil.com

第三节　长源距声波全波列测井

一、波列分析

当发射探头发射声波时，由于声波探头的指向特性不单一，使得入射波会以不同的入射角入射到井壁上，不同的入射角会产生不同的波型成分。

①当入射角$\alpha = i_1$（第一临界角）时，在井壁上产生滑行纵波。

②当$\alpha = i_2$（第二临界角）时，在井壁上产生滑行横波；

③当$\alpha > i_2$时，此时入射的声波会形成全反射波，产生伪瑞利波，其波速介于泥浆速度和地层横波速度之间。

④当$\alpha = \dfrac{\pi}{2}$时，发射探头发出的声波，经过相互干涉、迭加，会在井内形成驻波，它是以类似于活塞运动的方式向前传播。这种波称为斯通利波，其传播速度比泥浆速度略低。

以上四种波到达接收探头的顺序为：

①滑行纵波：传播速度快，幅度小；

②滑行横波：紧接在纵波后面，幅度大于纵波；

③伪瑞利波：其幅度大于滑行纵波和横波；

④斯通利波：最后到达，幅度较大。

二、长源距声波全波列测井的基本原理

1、声系及记录方式

斯伦贝谢公司目前使用的长源距全波列测井仪的声系由两个发射探头T_1、T_2和两个接收探头R_1、R_2组成。如图：

该声系与前面所讲的声系不同。该声系的发射探头在声系的一端、探头间的距离如图。该声系可采用四种记录方式，T_1R_1、T_1R_2、T_2R_1和T_2R_2，也就是说该声系可组合成源距不同的四种单发单收声系，记录四条相应的时差曲线。

2、补偿原理

类似于双发双收声系的补偿原理，不再多讲。

一般认为，人们采用长源距的优点在于利用纵波、横波等各个波群传播速度不同的特点，使得各种波在时域内能够比较容易分开，这样有利于分析每种波群的传播速度。

3、全波列纵、横波时差的提取

A、人工波形识别法：用人工观察远近波形中纵波和横波的波至点，并将它们对应的波至读出，进而提取纵、横波时差，该方法比较笨，处理速度慢且精度不高，一般不采用。

B、计算机识别方法：相关对比法、互功率谱法、最大熵法以及相似相关法。这些方法但都属于测井资料处理的内容，这里不多讲。

三、曲线应用

1、估算储集层的孔隙度

2、判读岩性

博客石油
www.blogoil.com