

# 研究报告

## 短源距全波列声波测井的数据处理

朱正亚 程宁亚 王伟平 祖庆夕 李恩锋

(南京大学声学研究所)

(煤炭部地球物理勘探公司)

1988年10月25日收到

本文介绍了用能量相位跳变法和子波逼近法,对短源距(3—4英尺——1英尺=0.3048m)全波列声波测井数据进行的处理,从而确定井壁岩体纵横波声速的方法。用这两种方法处理了人工模型井及12口钻井的全波列声波测井数据。在测井解释图上得到了纵横波声速曲线及多种岩体弹性参数曲线。将数据处理的结果与模型井和700多块岩芯试样的纵横波声速值作了对比,获得了较好的一致性。

### 一、引言

全波列数字声波测井技术是八十年代发展起来的一种测井新技术,它利用数字技术完整地记录了在井孔条件下激励的滑行纵波、横波、伪瑞利波和斯通利波等模式的声波,并从中提取多种声学参数,从根本上改变了原有声波测井仪仅能探测纵波声速和声幅的状况。在已知岩石密度的情况下,由纵波和横波声速可计算出有关井壁岩体特性的多种参数,尤其是能够提供其他测井方法所不能探测的岩石弹性参数,而这些参数对煤田地质、石油地质、工程和水文地质都是十分重要的。

为了使全波列接收信号中的纵横波信号能在时域上较好地分离,通常须采用长源距声波测井系统,例如斯伦贝谢测井公司的长源距声波测井仪,其源距为8—12英尺;然而,目前我国石油和煤炭地质勘探中使用的仪器大多数都是源距在3—4英尺之间的短源距声波测井仪。在短源距情况下,所接收到的全波信号中纵波与横波严重叠加,所以在短源距条件下提取横波参数是十分有意义的研究课题。

本文在介绍井孔中声场分布的基础上,着重介绍了两种从短源距全波列信号中提取横波声速的数据处理方法,并处理了人工模拟井及实际井的测井资料,将数据处理的结果与模拟井和岩芯试样的纵横波声速值作了对比分析,结果表明两者有较好的一致性。

### 二、井孔中的声场分布

理论计算结果表明<sup>[1-2]</sup>,点声源在高速地层的井孔中将激励滑行纵波、横波、伪瑞利波和斯通利波,而在地层的横波声速小于井液声速的低速地层井孔中,仅存在滑行纵波和斯通利波。

滑行纵波和横波分别是 $\lambda$ 射角为第一和第二临界角的声波在井壁界面折射而形成的。滑行纵波以井壁岩体的纵波速度沿井轴方向不衰减地传播。滑行横波以略低于岩体横波声速的速度传播,振幅沿井轴方向不衰减(这里所说的衰减不考虑传播介质的物理衰减)。这两种体波在井内液体中都是以纵波形式传播,在井壁发生临界折射后,分别以纵波和横波形式传播,并不断地发生逆折射返回井内液体中。在软地层中第二临界角不是实数,所以就不会产生能够

传播的横波。

伪瑞利波和斯通利波都是存在于井壁表面的表面波，它们的传播速度都有频散现象。它们的幅度沿井轴方向上不衰减，但在垂直井轴的方向上则随距井壁的距离而变化。在井壁处幅度最大，离开井壁越远幅度越小。伪瑞利波的传播速度介于井液声速与地层横波之间，低频分量的声速大于高频分量。斯通利波的速度约为井液声速的 0.9—0.96%。从射线声学的观点来看，伪瑞利波对应于大于第二临界角的全

反射波，斯通利波对应于第一和第二临界角之间的全反射波。

不同模式的声波传播速度不同，经过的路径也不尽相同。当发射与接收之间的源距足够长时，由于它们到达接收器的时间不同，使得不同模式的声波能量在时域上得到分离。然而，在短源距条件下，不同模式的声波叠加就更为明显，但同时由于短源距声系所接收到的声波，在井轴方向旅行的距离较短，径向透入的深度较浅，使其波形的畸变减小。

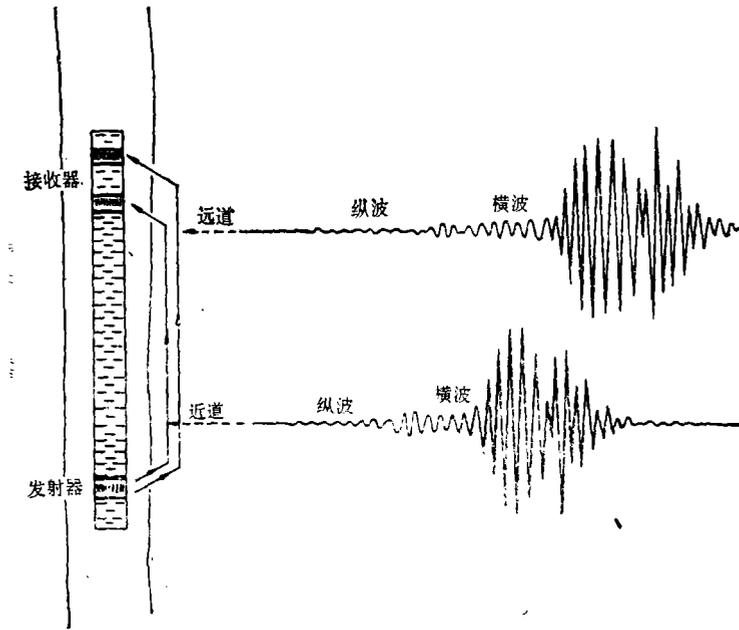


图1 一发双收测井系统及全波列接收波形示意图<sup>[3]</sup>

图1是一发双收测井系统及其接收到的全波列波形示意图。

### 三、数据处理的方法

我们利用美国 Mount 公司的 System III 型声波测井仪在 3 英尺和 4 英尺源距条件下所采集的全波列数据，分别采用了能量相位跳变法<sup>[4]</sup>和子波逼近法<sup>[5]</sup>进行了处理，从而确定出横波和纵波到达的时刻及传播的速度。

能量相位跳变法首先利用信号中的相位跳变点确定新信号的到达时刻，再从时间和能量

上判断该新信号是否具有滑行纵波和横波的特点，从而确定其到达的准确时间<sup>[4]</sup>。

设声波测井信号是一解析信号  $D(t)$ ：

$$D(t) = R(t) + jI(t) \quad (1)$$

而测井仪器记录到的信号仅是它的实部信号  $R(t)$ 。为了恢复出  $D(t)$  信号，必须得到其虚部  $I(t)$ 。在已知实部  $R(t)$  的情况下，由希尔伯特变换可确定其虚部  $I(t)$ ：

$$I(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R(\tau)}{\pi(t-\tau)} d\tau = H[R(t)] \quad (2)$$

在此基础上可进一步计算出解析信号  $D(t)$  的瞬时相位  $P(t)$  及其能量（包络） $E(t)$ ：

$$P(t) = \lg^{-1}[I(t)/R(t)] \quad (3)$$

$$E(t) = \sqrt{R^2(t) + I^2(t)} \quad (4)$$

由瞬时相位求导数, 则可得到其瞬时频率  $F(t)$ :

$$F(t) = \frac{d}{dt} p(t) \quad (5)$$

在一个连续信号中由于新的信号的出现和叠加, 会引起原信号相位上的畸变 (跳变), 这种相位畸变将在瞬时频率曲线上反映得十分明显, 换言之, 接收信号的瞬时频率对于新信号的叠加而引起的相位跳变是极为敏感的. 由此我们可以利用全波列接收信号的瞬时频率来确定新信号的出现和达到的时刻.

图 2 绘出了模拟井中接收到的全波列波形及其瞬时包络和瞬时频率. 从图中可以看到, 在整个全波信号中可能有多个新信号叠加, 也就会出现多个瞬时频率的峰值, 故还需进一步确定哪一个新出现的信号是我们寻求的纵波和横波. 在全波列信号中, 滑行纵波最先被接收, 即为首波, 所以由瞬时频率中的第一个峰值即可确定纵波到达的时刻.

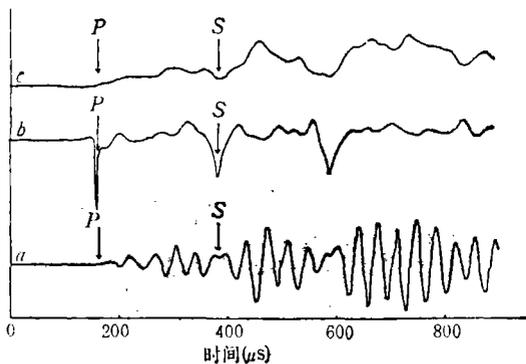


图 2 模型井中的全波列声波波形 (a)、瞬时包络 (c) 和瞬时频率曲线 (b)。

在确定哪一个瞬时频率峰值是横波到达时间时, 我们利用了下述两个判据

1. 横波到达时间  $t_s$  在纵波到达时间  $t_p$  的 1.4 倍和 2.1 倍之间, 即

$$1.4t_p \leq t_s < 2.1t_p \quad (6)$$

2. 横波的幅度一般大于纵波, 这样造成横波的瞬时包络值大于纵波部分的包络值, 即有

应用声学

$$E_s(t) \geq E_p(t). \quad (7)$$

利用能量相位跳变法可以独立地由远接收器或近接收器接收到的全波信号, 确定纵波和横波到达时间. 在计算希尔伯特变换时, 采用了两次傅氏变换, 使得运算速度较快.

子波逼近法是根据声测井仪器的频率响应和大量试验的结果, 建立一个标准子波波形函数  $A(t)$ :

$$A(t) = e^{\alpha t} \sin \omega t \quad (8)$$

式中  $A(t)$  表示子波的幅度,  $\omega$  为圆频率,  $\alpha$  为增长系数 ( $\alpha > 0$ ). 它们主要取决于测试系统的中心频率、频率响应和声源脉冲波形.

通常选取子波函数的前两个周期作为标准子波数组  $\{A_i\} (i = 1, 2, \dots, N)$ , 分别与远道和近道接收信号计算相关系数  $L_j(t) (j = 1, 2)$ :

$$L_j(t) = \frac{\sum_i A_i \cdot R_{ji}(t)}{\sqrt{\left[\sum_i A_i^2\right] \cdot \left[\sum_i R_{ji}^2(t)\right]}}, \quad (9)$$

$$i = 1, 2, \dots, N.$$

$$j = 1, 2.$$

式中  $A_i$  表示标准子波前  $N$  个波形幅度采样值,  $R_{1i}(t)$  和  $R_{2i}(t)$  (当  $j$  分别为 1 和 2 时的  $R_{ji}(t)$ ) 分别表示  $t$  时刻以后远道和近道接收信号的幅度采样值,  $L_1(t)$  和  $L_2(t)$  则分别表示标准子波与  $t$  时刻以后接收到的远道和近道波形的相关系数.

由于纵波是首波, 随着时间  $t$  的增加, 相关系数出现的第一个峰值, 则表示着纵波的到达. 由此分别  $L_j(t)$  出现第一个峰值的附近截取远道和近道接收信号的一段波形, 直接计算它们的互相关系数, 可以较精确地确定纵波到达的时刻.

在确定了纵波到时  $t_p$  之后, 可在 (6) 式所限定的时间范围内, 计算相关系数  $L_j(t)$ , 按

$$L_j(t) \geq 0.7 \quad (10)$$

可在两道接收波形上确定若干子波段, 然后再分别计算子波段的相互系数, 并依据 (6) 式和 (7) 式的判据, 由最大相关系数确定横波到达时间, 从而得到横波声速.

在计算横波的相关系数之前，还对近接收信号进行了预处理，即用远近两道接收信号在对齐纵波到时的条件下进行相减，可得到一新的波形  $R'(t)$ ：

$$R'(t) = R_2(t) - R_1(t - \Delta t_p) \quad (11)$$

式中  $\Delta t_p$  是两接收信号中纵波到达时间差。由

于在短源距条件下，声波在井壁岩体中旅行的距离较短，波形的畸变较长源距条件要小，所以新的波形  $R'(t)$ ，可在一定程度上减少了纵波信号对横波信号的叠加，使横波信号更为明显。

在获得岩体纵横波声速后，可以计算其泊松系数，在已知岩体密度参数时，可由计算得到

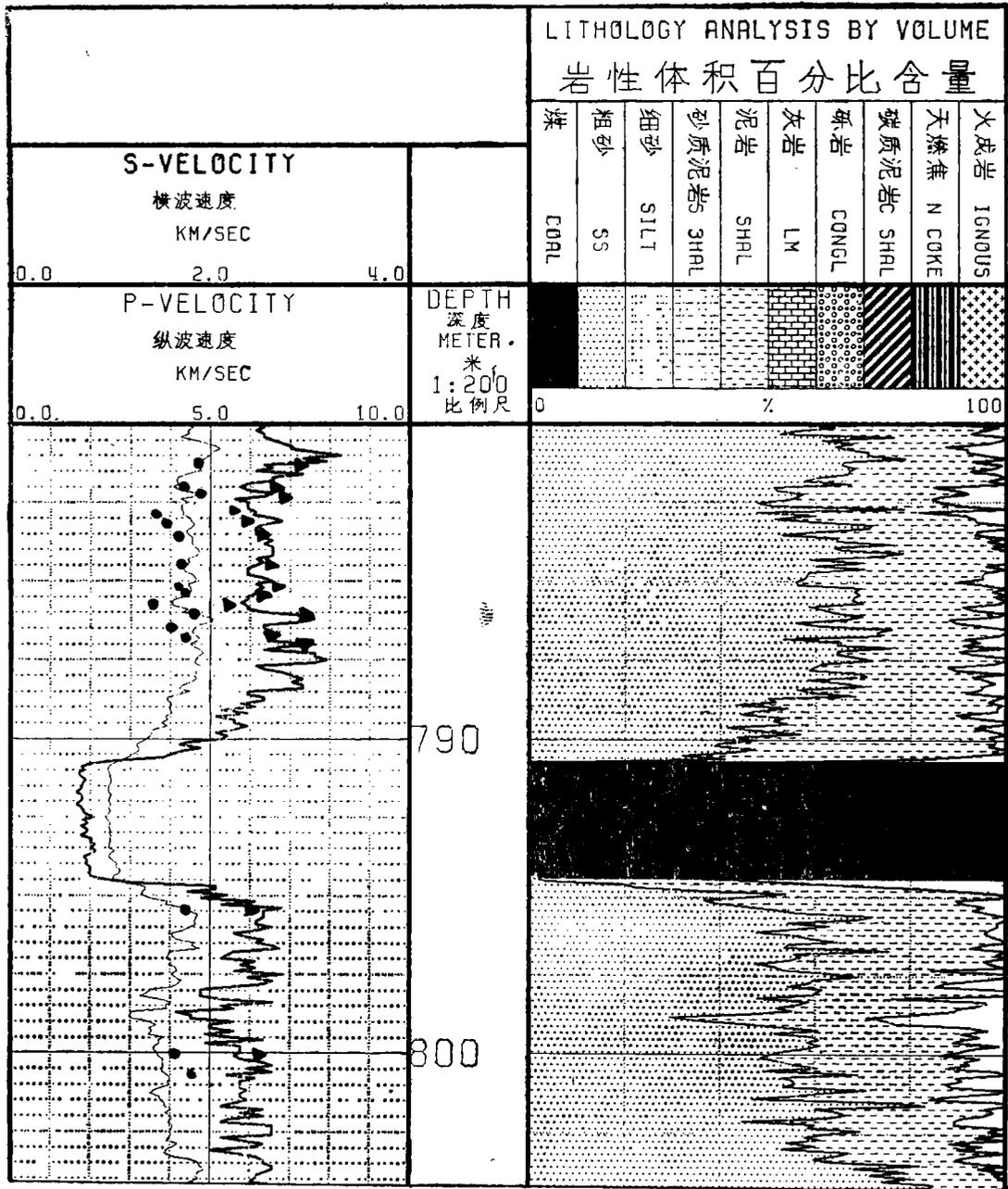


图3 用子波逼近法处理的 T3—2 井纵横波(细线表纵波,粗线表横波)声速曲线和岩芯纵横波(●表纵波,▲表横波)声速值。

岩体的扬氏模量、体积模量,切变弹性模量以及岩体的准抗压强度等一系岩体弹性参数,为地质解释提供了新的物理参数。

## 四、模型井和现场试验

利用上述数据处理方法,处理了在人工模型井和六个勘探区 12 口井的全波列声波测井数据,并与模型井的实测声速值和 12 口井中采集的 700 多块岩芯的纵横波声速值作了对比分析。

为了能较准确地验证数据处理得到的声速值与实际井孔岩体声速之间的差异,利用人工模型井进行了试验。模型井是用混凝土浇注的圆柱体,外径 0.57m,高 4.3m,在轴线上有一直径为 7.5cm 的充液井孔。由声波测井仪测得的近道波形如图 2 所示,经数据处理确定的纵波声速为 3730m/s,横波声速为 2170m/s。用岩体声波仪在模型井井体上直接测量了井体的纵横波声速,分别为 3700m/s 和 2100m/s。由此可以看出,计算值与实际值在误差范围内很好一致。

在山西省和山东省的 12 口煤田勘探井中进行了短源距全波列声波测井,用上述两种方法对所测的数据进行了处理,在标准测井解释图上绘制得到纵横波声速曲线。试验数据的处理结果表明,上述两种方法得到的声速曲线基本上是一致的。从这 12 口井中共采集了 700 多块岩芯试样,经加工后,在室内用 CTS-25 型声波仪测量了岩芯的纵横波声速值。在测井解释图上直观地比较了计算值与实际值的差异。

图 3 是山东唐口勘探区 T3-2 孔测井解释图的一部分。图中标出了 782.2m 至 801.0m 层段 15 块中粗砂岩岩芯的纵横波声速值。图 3

的右边绘出了由核测井和电测井资料计算得到的岩性分析图。从图中可以看到大部分对比井段数据处理的声速值与岩芯声速值有较好的一致性。12 口井的对比结果表明二者的误差一般在  $\pm 10\%$  以内。声速曲线与岩性也有较好的对应关系。

## 五、结 论

短源距声波全波列测井系统,由于源距较短,在井孔中激励的纵波和横波在时域上有严重的重叠。同时由于声波在岩体中经历的路程较短,接收波形的畸变较小。由此,本文介绍了两种处理短源距声波测井数据的方法。能量相位跳变法主要利用了纵横波出现时引起的相位突变,由瞬时频率的峰值确定纵横波到时。子波逼近法利用相关处理技术和纵横波的统计特性,有效地克服了用阈值法判断首波的误差,提高了确定纵横波声速的精度。通过人工模型井和 12 口井孔的对比试验结果表明,用本文所介绍的两种方法,处理硬地层的声速计算值与实验的纵横波声速值有较好的一致性,从而为地质解释提供了一系列与岩体弹性参数有关的新参数。

## 参 考 文 献

- [1] Cheng C. H., and Toksöz M. N., SPWLA 215th Ann. Log. Symp., 1980.
- [2] Karjian A. L., *Geophysics*, 50 (1985), 852—866.
- [3] Ingram J. D., Morris C. F., and Macknight E. E., *Geophysics*, 50 (1985), 1746—1755.
- [4] Dennis J. R., and Wang S. Y., SPWLA 25th Ann. Log. Symp., 1984.
- [5] Cheng C. H., Toksöz M. N., and Willis M. E., SPWLA 22nd Ann. Log. Symp., 1981.