

全波列声波测井评价低比重水泥 固井质量问题探讨

章成广 王冠贵

(江汉石油学院)

本文通过模拟计算套管井中理论波型,分别讨论了钢—水泥—地层胶结好坏三种情况,认为全波列声波测井不仅能评价低比重水泥固结质量,而且还能解决水泥胶结第二界面问题。这对石油工业勘探开发过程中,提高固井质量、防止油层污染,油水窜流等现象有着十分重要意义。

一、引言

为了防止油田污染,保护油层,近来发展了一种低比重高强度水泥浆固井新工艺。在国外1978年就采用了泡沫水泥,这种水泥是通过对水泥浆充氮气使成泡沫状来降低它的比重。国内目前也开始研究用玻璃微珠作为降重剂配制成水泥浆,它具有比重低,强度高的特点,能减少油层污染,满足井下作业。象泡沫水泥还具有触变性好的特点,特别适用于封堵漏失带和空洞、也能改善地层的分隔,并能使套管和水泥、水泥和地层之间保持接触、在国外已开始广泛应用。

由于低比重水泥的应用对测井检测是个挑战,常规水泥胶结测井方法如声幅测井,

是否仍有效?由于低比重水泥性能与常规充填水泥性能不同,评价方法也要修改。国外对比已作了一些探讨,在国内还未见过这方面资料。

另外,第二界面问题一直是个悬而未决的问题,过去用变密度测井方法作定性评价,起到一定作用。本文在这些方面作了初探,认为用全波列声波测井能解决第二界面问题。下面分理论模型和计算的波型与水泥固井关系二部分来讨论。

二、套管井中理论模型

在套管井中,中心层为泥浆,最外层是地层,之间有钢管、水泥环及流体环形隙。取柱坐标系Z轴与井轴重合,点声源S(W)

很好。

参考文献

- [1] ephir J. and Maklad N F Digital scan Converter in diagnostic ultrasound imaging Proc IEEE67. 654-664(1979)
- [2] Jonathan ophir and Johan M Brinch Moire Undersampling artifacts in

- digital Ultrasound images Ultrasound imaging 4. 311-320(1982)
- [3] K Ito et al A real-time Ultrasonic diagnostic system for dynamic and Still images; Wireless echovision JEE Dec1977

置于坐标系原点, 则离发射器Z处井内声场位移函数为

$$\phi(r, z, t) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega e^{-i\omega t} S(\omega) \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ikz} [k_0(l_1 r) + A_1 I_0(l_1 r)] \quad (1)$$

式中 K_0 、 I_0 为虚宗量贝塞尔函数,

$$l_1 = \sqrt{K^2 - \frac{W^2}{v_f^2}}$$

是泥浆波波数在径向r上

分量, A_1 是与径向各层介质性有关参数。

(1) 式中入射波部分沿实轴积分可得到

$$\int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ikz} k_0(l_1, r) = \frac{\pi \exp\left(\frac{i\omega}{v_f} \sqrt{r^2 + z^2}\right)}{\sqrt{r^2 + z^2}} \quad (2)$$

则在井轴上 ($r=0$) 处势函数有

$$\phi(0, z, t) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega e^{-i\omega t} S(\omega)$$

$$\left[\frac{\pi \exp\left(\frac{i\omega}{v_f} Z\right)}{Z} + 2 \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ikz} A_1 \right] \quad (3)$$

考虑到支割线积分在复平面内, 引入频率虚量 W_i , 则有

$$\phi(0, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{0-i\omega_r}^{\infty-i\omega_r} d\omega e^{-i\omega t} S(\omega) \left[\frac{\exp\left(\frac{i\omega}{v_f} Z\right)}{Z} + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} dk e^{ikz} A_1 \right] \quad (4)$$

由(4)式用离散波数法和二维付氏快变技术就能得到套管井中合成波型。

在实际计算时要考虑声波衰减, 引入复速度

$$V = V(W_0) \left[1 + \frac{1}{\pi Q} \log\left(\frac{W}{W_0}\right) - \frac{i}{2Q} \right] \quad (5)$$

式中 W_0 为中心频率, Q 为衰减系数有关参

质因子。计算(4)式时关键要求得系数 A_1 值。按文献[3]提供的, 在钢—水泥—地层胶结好的情况下, 由于固体—固体界面应力、位移是连续的, 井中不存在横波, 地层中不存在反射波, 得到式中 I_0 、 I_1 、 K_0 、 K_1 分别为一类、二类虚宗量贝塞尔函数, ρ_1 、 r_1 分

$$A_1 = \frac{I_1 k_1(l_1 r_1) F_1 - \rho_1 W^2 k_0(l_1 I_1) F_2}{I_1 r_{10}(l_1 r_1) F_1 + \rho_1 W^2 I_0(l_1 r_1) F_2} \quad (6)$$

$$F_1 = G_{13} G_{43} - G_{31} G_{43}$$

$$F_2 = G_{13} G_{11} - G_{11} G_{43}$$

别为套管内径和泥浆密度, G_{11} 是与径向各层介质及频率有关的矩阵中元素, 可由应力、位移向量之间关系求得, 见附录*。

如果井与地层有流体环形隙存在, 求 A_1 变得复杂, 因为流体—固体界面切应力为0, 切向位移是不连续的, 因此 A_1 只能解每层边界条件方程得到。

三、合成波型与固井质量关系

针对目前出现的低比重水泥浆, 我们分三种情况: 1. 流体—钢—水泥—地层 2. 流体—钢—流体—水泥—地层 3. 流体—钢—水泥—流体—地层进行了讨论。前者相当于水泥胶结好情形、后二者相当于自由套管、部分胶结情形。我们还讨论了水泥密度 ρ 、速度 V 、衰减量 Q 对波型幅度影响, 以便找出它们间关系进行评价。

计算合成波型、经向上各层介质参数如下表:

计算的频率范围为(0, 25)延期时间为4000微秒, 中心频率为13千赫, 源距为10英尺。考虑到计算速度取 $dk = 0.1$, 这对波型分析是够了。

1. 流体—钢管—水泥—地层

如图(1)按表1计算得到波型。地层纵波、横波部分的波形清晰, 幅度较大, 到达时间分别是738微秒、1265微秒左右。泥浆波大

表 1

参数 层	外径 r (英尺)	纵波速度 V_p (千英尺/ 微秒)	横波速度 V_s (千英尺/ 微秒)	密度 ρ (克/厘米 ³)	纵波品质因子 Q_p	横波品质因子 Q_s
流体	0.154167	5.5	0	1.2	20	0
钢管	0.18750	20	11	7.5	1000	1000
水泥	0.33330	9.25	5.67	1.35	50	50
地层	无限用0代替	16	8.53	2.16	60	60

约延续了1818微秒到达，幅度最大，泥浆波后的波是高频假瑞利波，大约延迟2270微秒到达。套管波幅度很小，已被地层波掩盖分辨不清，水泥波看不到可以忽略。下面改变水泥速度、密度，品质因子及地层速度来讨论对波型影响。

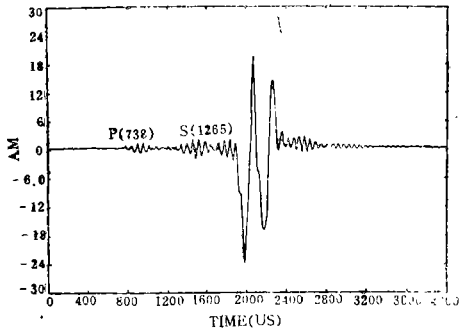


图1 水泥胶结好的情况

(1) 水泥速度对波型影响

图(2)是水泥速度提高到 $V_p = 13.5$, $V_s = 8.53$

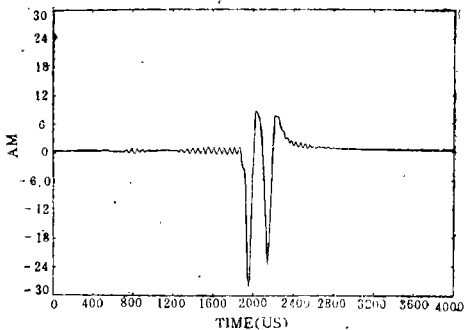


图2 水泥与钢管,地层都胶结好。水泥 $V_p = 13.5$, $V_s = 8.53$ 得到波型图,与图(1)比较可以看出

波幅衰减较大,套管波幅度已看不到可以忽略,而地层波信息变得更清晰,这是因水泥刚性增强速度增大有更多的声能进入地层,使反射到井中声能变小。

从上分析可以看出,水泥参数速度、密度、衰减系数对波型有影响、特别是速度变化对波形影响很大。需要指出的是这些参数对高频假瑞利波有较大影响,这一点被人们忽略。因此我们可以根据波型幅度变化与水泥参数建立关系,就可做到定量评价水泥固井质量。我们还可注意到当地层速度较高时,能有效提取地层纵、横波信息。这对评价地层性质是非常有用的。

2. 流体—钢管—流体、水泥—地层

我们以这种模型模拟自由套管的情形,就套管—水泥间流体环形隙厚度变化来考虑对波型的影响。

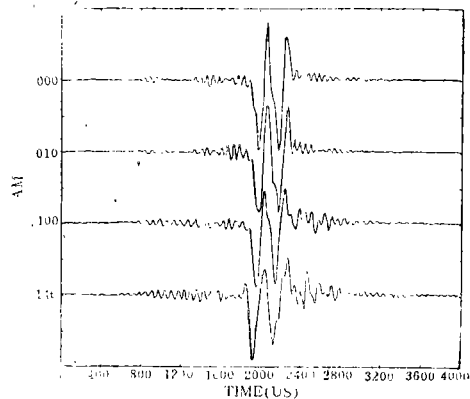


图3 自由套管情形

图3钢管与水泥间环形隙厚度为0, 0.1, 0.01到完全没有水泥环波型比较,可以看出随流体层厚度增加,套管波幅度逐渐增大、地层波变得不清晰,泥浆波后波幅增大、频率减小,出现次生斯通利波,当厚度为0.1时,完全相当于自由套管的情形。

由此可以看出流体环形隙存在,对套管波的幅度有明显影响,因此利用套管波幅度衰减系数能有效测出钢管与水泥胶结好坏,这在过去用声幅测井已经解决了的问题。对

于低比重水泥,过去的解释图版要进行修改、参看文献[6]。

3. 流体—钢管—水泥—流体—地层

我们以这种模型模拟部分胶结的情况。如图4,水泥与地层间增加了一层流体环隙。从图中可以看出随流体厚度增大也具有图3的性质,但此时流体厚度对地层波影响更大、当流体厚度为0.01时,地层波幅度有明显减小,利用这一点可以识别出流体层存在。

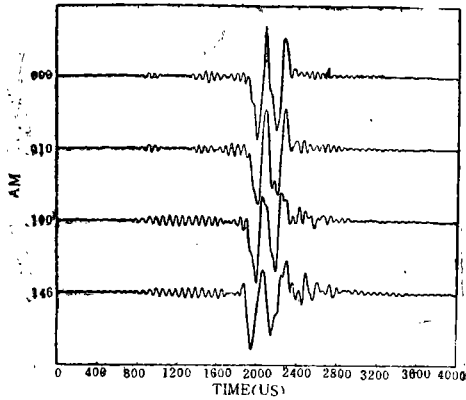


图4 部分胶结情形

可以看出无论是套管—水泥间,还是水泥—地层间存在流体环形隙对波型都有较大影响,在水泥胶结不好情况下,套管波幅度较大,当流体环形隙很小时,考察地层波幅度及出现的次生斯通利波有可能估计出环形隙幅度。如果参考裸眼井中全波测井效果会更好。

四、结论及今后工作

我们通过对套管井水泥固井三种理论波型进行了分析,认为全波测井不仅能评价水泥固结质量、而且还可以解决第二界面问题,但是实际问题更复杂,例微裂缝、油水窜槽、水泥污染等现象存在,并且测量时还

受水泥养护时间影响,因此进行实际模拟实验是必要的,这也是我们今后要做的工作。首先要进一步搞清理论模型与模拟实验得到波型相对照,搞清波形变化与水泥参数及地层性质关系,借助数字处理技术分析、提取各种波成分,并与水泥各参数建立关系做到定量评价,接着得到现场检验不断完善,这项工作无疑是具有实际意义的。

参考文献

- [1] Tsang, L., Rader, D. 1979, Numerical evaluation of the transient acoustic waveform due to a point source in a fluidfilled borehole, *Geophysics*, V. 44, p.1706—1720
- [2] Cheng, C.H., and Toksoz, M.N. 1981, Elastic wave propagation in a fluid-filled borehole and synthetic acoustic logs; *Geophysics*, V. 46, p.1042—1053
- [3] Tubman, K.M., Cheng, C. H., and Toksoz, M.N. 1984, Synthetic full waveform acoustic logs in cased boreholes; *Geophysics* V. 49, p.1051—1059
- [4] Baker, L.J., 1984, The effect of the invaded zone on full wavetrain acoustic logging; *Geophysics*, V. 49, p.796—809
- [5] 王冠贵、刘银兵, 1984, 井内声波全波列分析,《石油测井科技情报协作组第三次会议文集》, p61—73
- [6] Masson, J.P. 等, 1987, 水泥胶结测井中泡沫水泥固井质量,《测井分析家协会二十四届年会议文集》张义元等译, p271—276