

# 不同密度水泥石和微环尺寸情况下的套管波特征

郭辛阳<sup>1</sup> 沈忠厚<sup>1</sup> 步玉环<sup>1</sup> 李 娟<sup>1</sup> 苏远大<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 青岛 266555;2. 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院,山东 青岛 266555)

**摘 要:**利用声波变密度测井评价固井质量时,掌握不同情况下套管波的特征有助于套管波的分析 and 剔除,提高固井质量评价的精度。利用实轴积分法模拟分析了不同密度水泥石、不同微环尺寸情况下的套管波时域和频谱特征。结果表明:对于正常密度水泥石,第一、二界面完全胶结时,无套管波;第一界面存在不同尺寸微环时,套管波出现且套管波频率相同,但幅度差别不大。对于低密度水泥石,第一、二界面完全胶结时,出现较小幅度套管波,且水泥石密度越低,套管波幅度越大;第一界面存在不同尺寸微环时,套管波出现且各套管波频率相同,但幅度差别不大。对于同一套管,不同密度水泥石、不同微环尺寸情况下套管波具有相同的频率。

**关键词:**水泥石;微环;套管波;声波全波列测井;固井质量;数值模拟

**中图分类号:**TE21 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)04-0075-04

## Transmitting Feature of Sound Wave in Cased Well with Various Cement Density and Annulus Size

Guo Xinyang<sup>1</sup> Shen Zhonghou<sup>1</sup> Bu Yuhuan<sup>1</sup> Li Juan<sup>1</sup> Su Yuanda<sup>2</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong, 266555, China; 2. College of Geo-Resource and Information, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong, 266555, China)

**Abstract:** When using variable density log to evaluate the cementing quality, it is necessary to investigate the transmitting feature of sound wave in casing, which can help keeping and eliminating waves, and improving cementing quality. The time and frequency feature of casing wave at cased well with different cements density and different size of annulus were analyzed using real axis integral method. The results show that for normal cement density there is no casing wave when first and second interfaces were cemented completely. When different sizes of micro-annulus exist in first interface, casing wave appears with same frequency and small difference in amplitude. For low density cement, when first and second interfaces were cemented completely, small amplitude casing wave appears and amplitude increases with the decrease of cement density. When there exist different sizes of micro-annulus in first interface, casing wave appears with same frequency and small difference in amplitude. For same casing, the frequency of casing wave is same for different cement density and different micro-annulus

**Key words:** set cement; micro-annulus; casing wave; full wavetrain acoustic logging; cementing quality; numerical simulation

石油工程中,定义套管和水泥环的胶结界面为第一界面,水泥环和地层的胶结界面为第二界面。固井或后续作业会引起井下温度、压力的变化,这可能导致在界面处形成微环,微环的尺寸一般不大于 0.1 mm<sup>[1]</sup>。利用变密度测井进行固井质量评价时,微环的存在会导致套管波幅度增大,且高频的套管

波与地层波混杂在一起,影响固井质量评价的准确

**收稿日期:**2009-05-25;**改回日期:**2010-05-28

**作者简介:**郭辛阳(1983—),男,山东五莲人,2006年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,油气井工程专业在读博士研究生,主要从事固井、完井方向的研究。

**联系方式:**15266231375, gdayang@163.com

度。Tubman 等<sup>[2]</sup>研究了不同水泥胶结状况对声波测井波形的影响,指出微环的存在使初至波(套管波)幅度变大、振动持续时间变长,以致淹没后续的地层波。胡文祥等<sup>[3]</sup>对点声源下声场的波形进行了时频分析,但只考虑了不同胶结和岩石的情况,没有分析不同密度水泥石的情况。刁顺等<sup>[4]</sup>采用有限元方法分析了微环厚度对声波测井的初至波幅度的影响,并分析了声波的时域幅度特征,但没有分析套管波的频谱特征。孙建孟和苏远大等<sup>[5-6]</sup>提出在频域内提取地层波能量来定量评价第二界面胶结质量,但没有给出套管波频率的分析和确定方法。笔者采用实轴积分法模拟并分析了不同密度水泥石、不同微环尺寸情况下声波的时域及频谱特征。

## 1 井眼声场计算理论

套管井中的声波测井是研究声波在充满流体的柱状分层介质结构内传播的问题,其理论模型如图 1 所示。

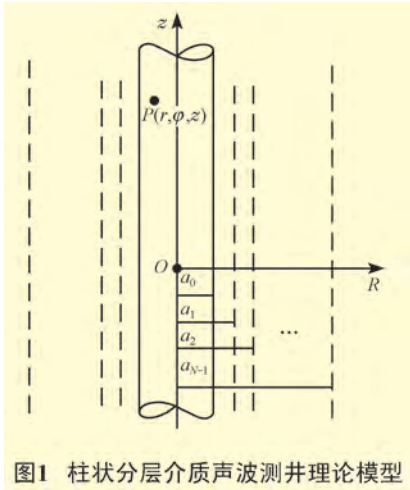


图1 柱状分层介质声波测井理论模型

井内流体介质为 0 层,被  $N$  层同轴介质层包围,由内向外依次为  $1, 2, \dots, N$ ,第  $N$  层为沿径向无限伸展的固体介质。各介质层的界面都是同轴柱面,其半径依次为  $a_0, a_1, \dots, a_{N-1}$ 。用  $v_{pi}, v_{si}, \rho_i$  分别表示第  $i$  层的纵波速度、横波速度和密度。以井眼中心轴线为  $z$  轴建立柱坐标系,点声源置于坐标原点,则点声源在介质空间激励的声场具有轴对称性。

在井内流体中某点  $P(r, \varphi, z)$  的稳态波函数可表示为:

$$\varphi(r, z, k) = [K_0(l_0 r) + A_0 I_0(l_0 r)] e^{ikz} \quad (1)$$

式中:  $I_0(l_0 r)$  和  $K_0(l_0 r)$  分别为第一类和第二类零阶修正贝塞尔函数;  $A_0$  为井壁响应系数;  $k$  为轴向波数。

层内半径为  $r$  处的位移、应力分量和相应系数  $A_i, B_i, C_i$  和  $D_i$  的关系方程分别为:

$$\begin{bmatrix} u_i(r) \\ v_i(r) \\ \sigma_i(r) \\ \tau_i(r) \end{bmatrix} = [M^i(r)] \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $A_i, B_i, C_i$  和  $D_i$  为第  $i$  层内波函数的响应函数系数,由井壁界面边界条件确定;  $u_i(r), v_i(r), \sigma_i(r), \tau_i(r)$  为相应位移和应力的径向和轴向分量;  $[M^i(r)]$  是  $4 \times 4$  方阵,其各元素都是半径  $r$  的函数。

利用 Thomson-Haskell 传播矩阵法容易得到由最外层介质中的波函数响应系数计算第 1 层介质中波函数响应系数的表达式:

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} A_N \\ B_N \\ C_N \\ D_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{M}$  称为向内传播矩阵,为  $4 \times 4$  数值矩阵,  $\mathbf{M} = [M^1(a_1)]^{-1} [M^2(a_1)] [M^2(a_2)]^{-1} \dots [M^N(a_{N-1})]$ 。

考虑到第  $N$  层介质中不存在会聚波,即  $B_N = D_N = 0$ ,且井内流体中无横波。利用井壁界面 ( $r = a_0$ ) 位移和应力分量连续、应力的轴向分量等于 0 的边界条件,可求得井内波函数的响应系数为:

$$A_0 = \Delta_1 / \Delta \quad (4)$$

其中,

$$\Delta = (M_{31} M_{43} - M_{33} M_{41}) M_{12}^0 - (M_{11} M_{43} - M_{13} M_{41}) M_{32}^0 \quad (5)$$

$$\Delta_1 = (M_{11} M_{43} - M_{13} M_{41}) M_{31}^0 - (M_{31} M_{43} - M_{33} M_{41}) M_{11}^0 \quad (6)$$

式中:  $M_{ij} (i, j = 1, 2, 3, 4)$  为向内传播矩阵  $\mathbf{M}$  的相关元素;  $M_{ij}^0$  是矩阵  $[M^0(a_0)]$  的元素。

从而使式(1)表示的井内稳态波函数  $\varphi(r, z, k)$  得到完全确定。

在第一界面存在微环的套管井声波测井模型中,应考虑井周介质夹有流体层的情况。利用 Thomson-Haskell 传播矩阵法,并在固-液界面处应用连续性边界条件,可得井周围介质中夹有一个流体层时的向内传播矩阵为:

$$\mathbf{M} = [M^1(a_1)]^{-1} \dots [M^{l-2}(a_{l-2})]^{-1} [M^{l-1}(a_{l-2})] \mathbf{M}'' \quad (7)$$

综合式(4)~(6)及式(7),便可求得井内波函数的响应系数  $A_0$ 。

位于井轴上坐标原点的点声源在井内场点  $P(r,$

$\varphi, z)$  的声压响应为:

$$P(r,z,t)=\int_{-\infty}^{\infty}X(\omega)e^{-i\omega t}d\omega\int_{-\infty}^{\infty}A_0I_0(l_0r)e^{ikz}dk$$

(8)

式中: $X(\omega)$  为声源频谱; $A_0$  可利用式(4)求出。

结合套管井水泥胶结质量的几种典型情况,利用式(8)采用数值模拟方法可模拟声波全波波形。

2 模型各介质的性质及声源参数

选取某油田一口井四开时的几何尺寸数据作为模型参数,其中井眼直径为 165.1 mm,套管内、外径分别为 109.0 mm 和 127.0 mm。各层介质的声学参数见表 1,声源选用中心频率为 20 kHz 的 Gauss 源。

表 1 各层介质声学参数			
介质	纵波速度/m·s <sup>-1</sup>	横波速度/m·s <sup>-1</sup>	密度/kg·L <sup>-1</sup>
钻井液	1 670		1.2
套管	5 941	3 251	7.8
地层	2 500	1 127	2.1
水泥石 1	2 121	1 215	1.3
水泥石 2	2 456	1 427	1.5
水泥石 3	2 682	1 560	1.7
水泥石 4	3 081	1 736	1.9
水泥石 5	3 343	1 850	2.0

3 结果分析

分别模拟不同密度水泥石和不同尺寸微环情况下声波在井眼中的传播情况。发射和接收换能器之间距离(即源距)为 1.5 m,分别对各种情况下的套管波进行时域和频谱特征分析。

3.1 正常密度水泥石、不同尺寸微环情况下套管波特征

固井工程中,不添加调节密度外掺料时的水泥石密度约为 1.9 kg/L,笔者将其称作正常密度水泥石。

图 2 和图 3 分别为正常密度水泥石、第一界面存在不同尺寸微环、第二界面胶结良好时的时域波形和频谱。由图 2、3 可以看出:第一、第二界面完全胶结时,时域波形和频谱图中都观察不到套管波;第一界面存在不同尺寸微环时,套管波出现,且幅度较大,但都具有相同的频率,此处约为 17.88 kHz;对于不同尺寸微环,套管波的幅度相差不大,时域和频域

波形几乎重合在一起,不易区分。因而,不能通过套管波的时域波形及频谱确定第一界面微环的尺寸。

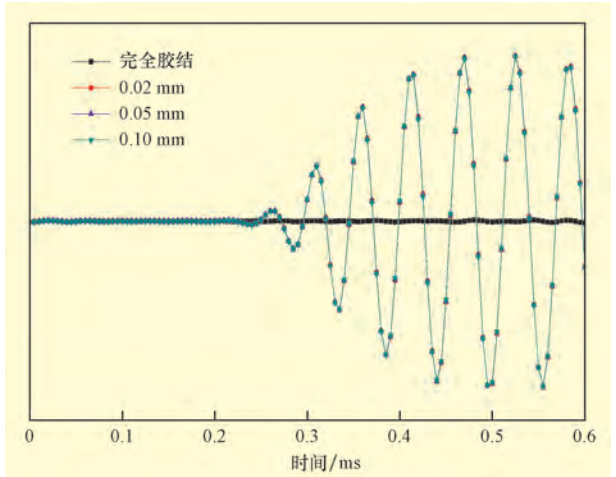


图2 正常密度水泥石、不同尺寸第一界面微环情况下套管波时域波形

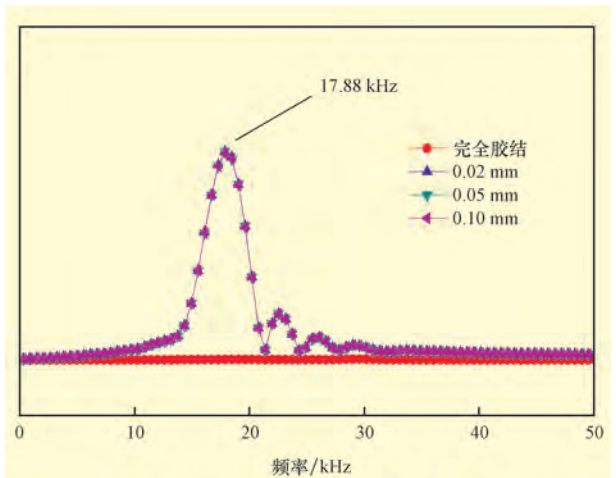


图3 正常密度水泥石、不同尺寸第一界面微环情况下套管波频谱

3.2 低密度水泥石、不同尺寸微环情况下套管波特征

油田固井时,要尽可能减小水泥浆液柱压力与油层压力之差,以保护油气层,因此常使用低密度水泥浆体系。笔者以密度为 1.3 kg/L 的水泥石为例进行套管波时域波形和频谱分析,图 4 和图 5 为密度 1.3 kg/L 水泥石、不同尺寸第一界面微环情况下套管波时域波形和频谱。

从图 4、图 5 可以看出:第一、第二界面完全胶结时,与正常密度水泥石不同,时域和频谱波形图中套管波具有一定的幅度,但幅度较小;当第一界面存在微环时,套管波幅度较大;第一、二界面完全胶结和存在微环时,套管波都具有确定的频率,此处约为 17.88 kHz;当存在微环时,不同尺寸微环的时域和

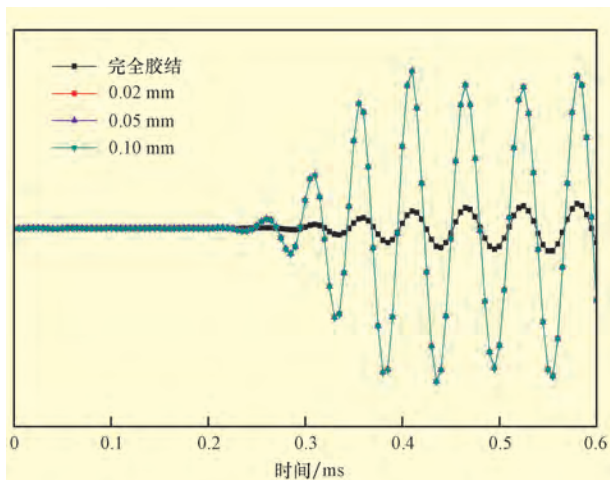


图4 水泥石密度为1.3 kg/L时,不同尺寸第一界面微环情况下套管波时域波形

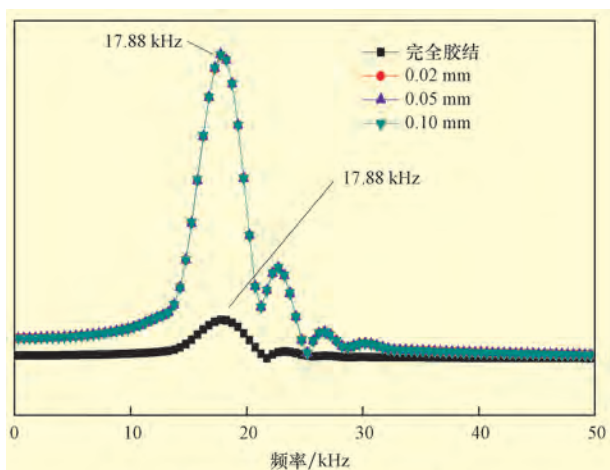


图5 水泥石密度为1.3 kg/L时,不同尺寸第一界面微环情况下套管波频谱

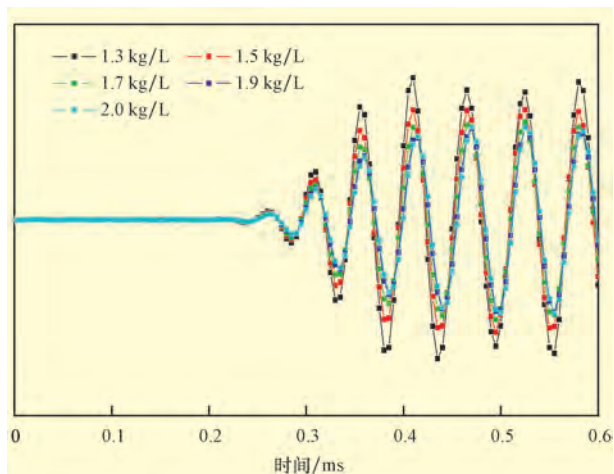


图6 不同密度水泥石、0.05 mm微环情况下套管波时域波形

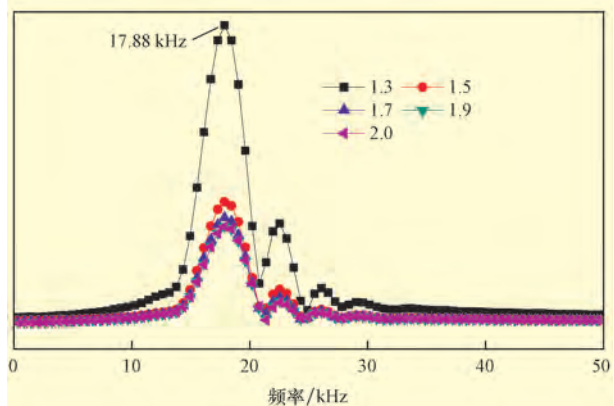


图7 不同密度水泥石、0.05 mm微环情况下套管波频谱

频域波形也几乎重合在一起,不易区分。

### 3.3 不同密度水泥石、同一尺寸微环情况下套管波特征

取微环的尺寸为 0.05 mm,分析不同密度水泥石情况下套管波的时域和频域特征,其时域波形和频谱分别如图 6、图 7 所示。

从图 6、图 7 可以看出:水泥石密度越低,套管波幅度越大;不同密度水泥石的套管波具有确定的频率,且频率大小几乎一致,此处约为 17.88 kHz。

## 4 结论

1) 第一、二界面完全胶结时,正常密度和更高密度水泥石情况下无套管波,低密度水泥石情况下出现套管波。

2) 同一套管,不同密度水泥石、不同微环尺寸情况下套管波都具有相同的频率。同一密度水泥石、不同尺寸微环情况下的套管波的幅度也几乎一致,不易区分;同一尺寸微环,水泥石密度越低,套管波幅度越大。

## 参考文献

- [1] 郭海敏. 生产测井导论[M]. 北京:石油工业出版社,2003:691-2003.
- [2] Tubman K M, Cheng C H, Cole S P, et al. Synthetic full-waveform acoustic logs in cased boreholes, II-poorly bonded casing [J]. Geophysics, 1986, 51(4): 902-913.
- [3] 胡文祥, 钱梦脉. 套管井声场合成波形及其时频特征分析[J]. 声学学报, 2002, 27(3): 223-228.
- [4] 刁顺, 乔文孝, 杜光升. 声波测井对微环探测能力的研究[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(5): 540-542.
- [5] 孙建孟, 苏远大, 李召成, 等. 定量评价固井 II 界面胶结质量的方法研究[J]. 测井技术, 2004, 28(3): 199-202.
- [6] 苏远大, 孙建孟, 李召成, 等. 裸眼时差与变密度测井地层波能量相结合改进固井 II 界面评价[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(4): 38-41.