

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2009.06.019

轴对称套管井井孔声场特征分析

秦正贵, 张宏兵

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了给检测套管井固井水泥胶结质量提供依据, 采用实轴积分方法研究了不同胶结情况下的套管井井孔声场。结果表明: 第一界面发生窜槽时, 会产生一个沿着钢套管传播的振铃信号; 第二界面发生窜槽时, 会产生沿着钢套管和水泥层复合体传播的伪瑞利波信号; 2 个界面同时窜槽时, 能接收到一个传播速度约等于钢套管纵波速度的振铃信号, 但是它的波形振动频率较低。另外, 不同的胶结情况, 在二维谱中会产生特点不同的耦合变形。

关键词: 套管井; 声波测井; 实轴积分法; 第一界面; 第二界面; 二维谱

中图分类号: TE26 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2009)06-0707-05

利用声全波检测套管井固井水泥胶结质量, 国内外评价第一界面胶结质量方法已经比较成熟, 并且已经建立了声波测井的行业解释标准。一些学者对评价第二界面胶结质量方法进行了有益的探索^[1-3], 但还没有很好地解决这个问题, 需要进一步做深入的井孔声场特征研究。

井孔声场是声波测井的理论基础, 国内外学者对此做了大量研究。实轴积分法是井孔声场研究最基本的解析方法。针对裸眼井模型, Bio^[4]首次采用波动理论研究了硬地层中对称轴上声源激发的声波传播问题。White 等^[5]首次计算了全波列接收波形。Cheng 等^[6-7]等利用实轴积分法计算了井轴上不同源距处所接收到的全波列。张海澜等^[8]利用修改了的实轴积分法计算了整个声场的分布图像。在更接近实际情况的套管井模型研究上, Baker 等^[9]推导了径向多层固体介质中声场的解析式, Tubman 等^[10-11]研究了胶结良好套管井中的声传播问题。此外, 林伟军等^[12-13]利用有限差分技术模拟了裸眼井和套管井井孔声场。这些研究成果为研究井孔声场特征提供了理论基础, 但是, 现有文献很少关注与固井第二界面胶结质量有关的伪瑞利波特征。

本文利用实轴积分法模拟了套管井胶结良好、第一界面窜槽、第二界面窜槽和 2 个界面同时窜槽情况下的井孔声场, 得到在井轴上不同源距处接收的声波曲线和二维谱。通过对比分析, 总结出一些水泥胶结质量在声波曲线和二维谱上的响应特征。

1 套管井井孔声场分析

1.1 轴对称多层介质井孔模型

如图 1 所示, 建立 $r\theta z$ 柱坐标系。套管井在径向方向分成许多不同介质层。对于胶结良好的套管井, 井内是流体, 编号为 0, 往外依次是钢套管、水泥环、地层等, 依次编号为 1, 2, ..., N 。钢套管与水泥环之间的界面为第一界面, 水泥环与地层之间的界面为第二界面, 当第一界面或第二界面发生窜槽时, 中间夹有一薄水层。第 n 个分界面在第 n 层介质和第 $n+1$ 层介质之间, 半径是 r_n 。第 n 层介质的密度是 ρ_n , 如果是液体, 声速是 v_{fn} ; 如果是固体, 纵波声速是 v_{pn} , 横波声速是 v_{sn} 。声源位于柱坐标系的原点, 整个井孔是轴对称的, 激发的声场也是轴对称的, 位移发生在 rz 平面内, θ 方向的位移为零。

1.2 井孔声场解析分析

根据声学理论, 井内流体声压应当满足波动方程:

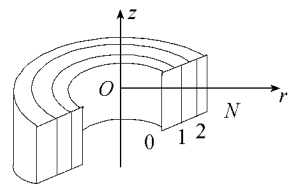


图 1 轴对称多层介质井孔

Fig. 1 Axially symmetric cased borehole with multiple layers of media

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{v_0^2 \partial t^2} \tag{1}$$

式中： p ——流体声压； v_0 ——流体的声速； t ——时间。对于井孔外的第 n 层固体，它应当满足固体介质中的弹性波动方程：

$$(\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) - \mu\nabla \times \nabla \times \mathbf{u} + \rho\omega^2 \mathbf{u} = 0 \tag{2}$$

式中： $\mathbf{u}$ ——位移； ω ——圆频率； λ, μ ——拉密系数，它们与固体介质波速有关。

根据偏微分方程和矢量分析的理论，通过引入位移位简化方程，最终可以得到式(1)的通解为

$$\varphi_0(r, z, t) = \frac{i}{4\pi\rho_0\omega^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [F(\omega)H_0^{(1)}(\alpha_0 r) + A_0(k, \omega)J_0(\alpha_0 r)] e^{ikz - i\omega t} dk d\omega \tag{3}$$

式中： $\varphi_0(r, z, t)$ ——位移位，可以通过它与井内流体声压的关系 $p = \rho\omega^2 \varphi_0$ 求取声压，与位移的关系 $\mathbf{u} = \nabla \varphi_0$ 求取位移； k ——波数； $F(\omega)$ ——声源的频谱幅度； $H_0^{(1)}$ ——第一类零阶汉克尔函数； J_0 ——零阶贝赛尔函数； α_0 ——径向波数，满足 $(\alpha_0^2 + k^2)v_0^2 = \omega^2$ 。式(3)大括号中的部分叫做频率波数域中的二维谱^[14]。因为式(3)是在 k - ω 平面内沿着实轴进行积分，因此就把它叫做实轴积分法。

式(2)的通解为

$$\varphi_n(r, z, t) = \frac{i}{4\pi\rho_0\omega^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [A_n(k, \omega)H_0^{(1)}(\alpha_n r) + B_n(k, \omega)H_0^{(2)}(\alpha_n r)] e^{ikz - i\omega t} dk d\omega \tag{4}$$

$$\eta_n(r, z, t) = \frac{i}{4\pi\rho_0\omega^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [C_n(k, \omega)H_0^{(1)}(\beta_n r) + D_n(k, \omega)H_0^{(2)}(\beta_n r)] e^{ikz - i\omega t} dk d\omega \tag{5}$$

式中： n ——地层编号； φ_n, η_n ——位移位，通过它们和位移的关系 $\mathbf{u}_n = \nabla \varphi_n + \nabla \times \nabla \times (\eta_n \mathbf{z})$ 求取位移，然后根据弹性力学的应力应变关系求取应力； A_n, B_n, C_n, D_n ——与波数和频率有关的待定系数； $H_0^{(2)}$ ——第二类零阶汉克尔函数； α_n, β_n ——径向波数，分别满足 $(\alpha_n^2 + k^2)v_{pn}^2 = \omega^2$ ， $(\beta_n^2 + k^2)v_{sn}^2 = \omega^2$ 。

式(4)和式(5)中的各个待定系数，可以通过边界条件求取。第 0 个分界面，是井孔内流体和井孔外的固体的分界面，它们应当满足应力、位移的连续边界条件为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_r|_0 = \mathbf{u}_r|_1 \\ -p|_0 = \sigma_{rr}|_1 \\ \mathbf{0} = \sigma_{rz}|_1 \end{cases} \tag{6}$$

第 n ($0 < n < N$) 个分界面，是固体和固体或固体和液体接触。为了便于求解方程组，可以将液体层（如窜槽水层）当作固体处理，也就是给它一个很小的横波速度。数值模拟结果表明，这种处理是可靠而高效的。为此，第 n 个分界面都可以看作固体和固体分界面，它们应当满足应力、位移的连续边界条件为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_r|_n = \mathbf{u}_r|_{n+1} \\ \mathbf{u}_z|_n = \mathbf{u}_z|_{n+1} \\ \sigma_{rr}|_n = \sigma_{rr}|_{n+1} \\ \sigma_{rz}|_n = \sigma_{rz}|_{n+1} \end{cases} \tag{7}$$

这样，有 1 个流体与固体接触的分界面，3 个边界方程； $N-1$ 个固体和固体接触的分界面， $4 \times (N-1)$ 个边界方程；总共有 $4N-1$ 个边界方程。而需要确定的待定系数是 $4N+1$ 个，比方程要多 2 个。但是，由汉克尔函数的性质可知，第二类汉克尔函数代表的是会聚波，而最外层固体无穷大，没有反射波向中心会聚，所以系数 B_N, D_N 为 0。这样，可以通过 $4N-1$ 个方程解出 $4N-1$ 个待定系数。当 N 比较大时，方程组维数较多，一般使用传递矩阵的方法解决^[14]。

2 井孔声场的波形和二维谱

根据前面的理论分析，建立 4 个和实际情况接近的模型，对比分析在井轴上不同源距处得到的波形和二维谱的特征。

2.1 胶结良好模型

2 个界面胶结良好时,套管井内是流体,井外分别是钢套管、水泥层和无限大快速地层.井孔半径 r_0 等于 0.1 m,钢套管厚度是 0.01 m,水泥层厚度是 0.02 m.各层的声速、密度和 Q 值(反映声波衰减)见表 1.声源位于柱坐标系的原点,声源选取高斯包络调制的正弦波,中心频率是 15 kHz,带宽是 6 kHz.整个声场是轴对称的.

根据前面的分析,把通解代入边界条件,解方程组,得到系数 A_0 ,代入式(3),先求得离散的二维谱,然后运用 2 次快速傅立叶变换,得到井内流体介质位移在时间空间域的波形.图 3(a)是井轴上不同源距处的接收波形,图中有 4 条斜线,自左到右分别是钢套管纵波、地层纵波、地层横波和井内流体声波传播的时程线.图 3(b)是井轴上的二维谱,4 条斜线斜率分别是上述 4 种波的相速度.

从图 3(a)可以看到,胶结良好时,没有沿钢套管及水泥层传播的波,地层波信号清晰可见,尤其地层横波比较强,地层纵波相对微弱.尾部一个强信号是沿井内流体传播的斯通利波.从二维谱分布图(图 3(b))可以看出 4 个井孔内传播模式(白颜色的),最底下的零阶模式近乎直线(图中不太明显),从 0 Hz 起始;一阶模式从 8~10 kHz 起始,并在波数为 3 左右的地方分叉成 2 个部分;二阶模式从 16~18 kHz 起始;三阶模式约在 24~25 kHz 起始.笔者从研究刚性管壁井孔模型得出,井孔内传播模式零阶模式成直线状,其余模式本应成完好的弧状,此处一阶模式出现分叉,应当是与井外介质中传播模式(此处主要是地层横波模式)耦合变形所致.

2.2 第一界面窜槽模型

第一界面窜槽时,在钢套管和水泥层之间存在一个水层.假设这层水介质是 10 mm 厚,参数取值和井内流体一样,其他介质层参数见表 1.计算得到井轴上不同源距处的接收波形如图 4(a)所示,井轴上的二维谱如图 4(b)所示.

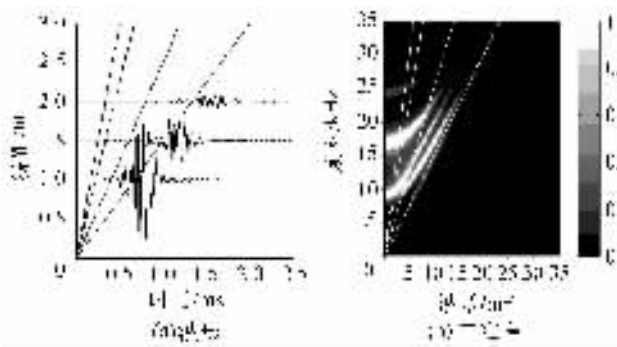


图 2 胶结良好时的波形和二维谱

Fig. 2 Waveforms and two-dimensional spectra under well-cemented case of first and secondary interfaces

从图 4(a)可以看到,第一界面窜槽时,产生了一个速度接近钢套管纵波速度的强烈信号,这就是指示第一界面窜槽了的振铃信号.一般认为,声源激发声波后,能量传播到钢套管,由于第一界面窜槽,钢套管两侧都是流体介质,声阻抗不匹配,入射角达到临界角时,能量就沿着钢套管传播,产生这种强烈的振铃信号,而透过钢套管向井外辐射的能量较少,地层的反射波也就很弱.因此,接收到的声波,主要就是沿钢套管传播的振铃信号和在孔内流体中传播的斯通利波信号.从二维谱分布图(图 4(b))可以看到,井内模式波与在钢套管中传播的模式波耦合变形清晰可见,在波数为 1~2 处发生错位,它的相速度大致等于钢套管纵波相速度.一阶模式从一开始就分成 2 个部分,一部分起始于 8~9 kHz,另一部分起始于 11~13 kHz;二阶模式也有微弱耦合变形.

2.3 第二界面窜槽模型

第二界面窜槽时,在水泥层和地层之间存在一个水层.假设这层水介质是 10 mm 厚,参数取值和井内流体一样,其他介质层参数见表 1.计算得到井轴上不同源距处的接收波形如图 5(a)所示,井轴上的二维谱如

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

径向介质	纵波速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	横波速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Q_p	Q_s
井内流体	1500	0	1000	50	50
钢 套 管	6000	3200	7800	200	200
水 泥 层	4000	2100	2400	80	80
快速地层	4500	2500	2500	30	30

图 5(b)是井轴上的二维谱,4 条斜线斜率分别是上述 4 种波的相速度.

从图 5(a)可以看到,胶结良好时,没有沿钢套管及水泥层传播的波,地层波信号清晰可见,尤其地层横波比较强,地层纵波相对微弱.尾部一个强信号是沿井内流体传播的斯通利波.从二维谱分布图(图 5(b))可以看出 4 个井孔内传播模式(白颜色的),最底下的零阶模式近乎直线(图中不太明显),从 0 Hz 起始;一阶模式从 8~10 kHz 起始,并在波数为 3 左右的地方分叉成 2 个部分;二阶模式从 16~18 kHz 起始;三阶模式约在 24~25 kHz 起始.笔者从研究刚性管壁井孔模型得出,井孔内传播模式零阶模式成直线状,其余模式本应成完好的弧状,此处一阶模式出现分叉,应当是与井外介质中传播模式(此处主要是地层横波模式)耦合变形所致.

2.2 第一界面窜槽模型

第一界面窜槽时,在钢套管和水泥层之间存在一个水层.假设这层水介质是 10 mm 厚,参数取值和井内流体一样,其他介质层参数见表 1.计算得到井轴上不同源距处的接收波形如图 6(a)所示,井轴上的二维谱如图 6(b)所示.

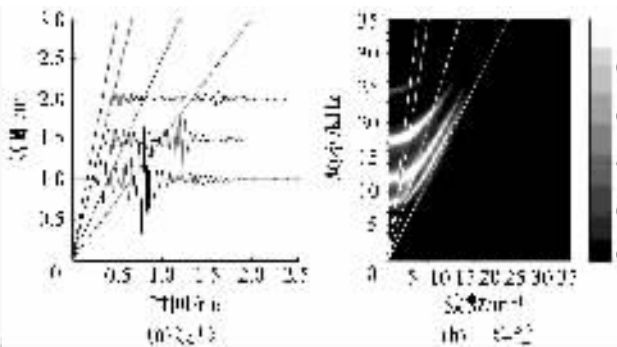


图 3 第一界面窜槽时的波形和二维谱

Fig. 3 Waveforms and two-dimensional spectra with failure of first interface

从图 6(a)可以看到,第一界面窜槽时,产生了一个速度接近钢套管纵波速度的强烈信号,这就是指示第一界面窜槽了的振铃信号.一般认为,声源激发声波后,能量传播到钢套管,由于第一界面窜槽,钢套管两侧都是流体介质,声阻抗不匹配,入射角达到临界角时,能量就沿着钢套管传播,产生这种强烈的振铃信号,而透过钢套管向井外辐射的能量较少,地层的反射波也就很弱.因此,接收到的声波,主要就是沿钢套管传播的振铃信号和在孔内流体中传播的斯通利波信号.从二维谱分布图(图 6(b))可以看到,井内模式波与在钢套管中传播的模式波耦合变形清晰可见,在波数为 1~2 处发生错位,它的相速度大致等于钢套管纵波相速度.一阶模式从一开始就分成 2 个部分,一部分起始于 8~9 kHz,另一部分起始于 11~13 kHz;二阶模式也有微弱耦合变形.

图 4(b)所示。

从图 4(a)可以看到,第二界面窜槽时,也产生了一个振铃信号,一般叫做伪瑞利波.它的速度要比第一界面窜槽时的振铃信号低,更加接近地层纵波速度.强度也要小很多.一般认为,声源激发声波后,能量穿过钢套管,到达水泥层,由于第二界面窜槽,钢套管与水泥层双层结构复合体两侧都是流体介质,声阻抗不匹配,入射角达到临界角时,能量就沿着钢套管与水泥层双层结构复合体传播,产生伪瑞利波,而向复合体外辐射的能量较少,地层的反射波很弱.因此,接收到的声波,主要就是沿着钢套管与水泥层双层结构复合体传播的伪瑞利波和在孔内流体中传播的斯通利波信号.从二维谱分布图(图 4(b))可以看到,井内模式波与伪瑞利模式波的耦合变形成分比较明显,在波数为 2 的地方发生错位,它的相速度接近地层纵波速度.一阶模式从一开始就分成 2 个部分,一部分起始于 8 kHz,另一部分起始于 10~11 kHz.

2.4 第一界面和第二界面同时窜槽模型

第一和第二界面同时窜槽时,在钢套管和水泥层、水泥层和地层之间分别存在一个水层.假设这 2 层水介质都是 10mm 厚,参数取值和井内流体一样,其他介质层参数见表 1.计算得到井轴上不同源距处的接收波形如图 5(a)所示,井轴上的二维谱如图 5(b)所示.

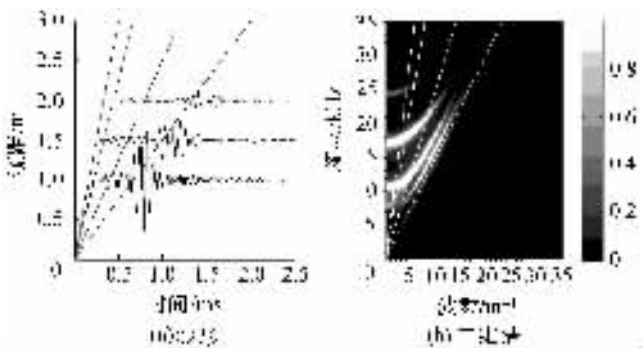


图 4 第二界面窜槽时的波形和二维谱

Fig. 4 Waveforms and two-dimensional spectra with failure of secondary interface

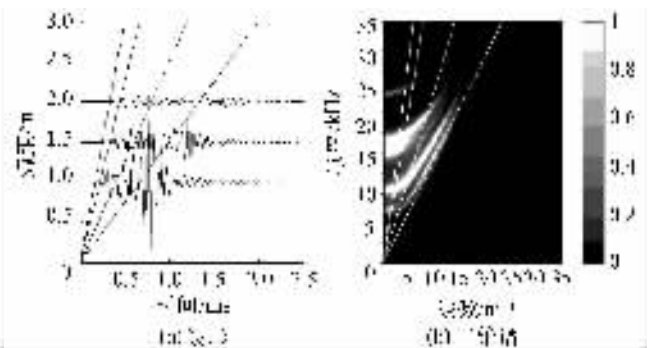


图 5 2 个界面同时窜槽时的波形和二维谱

Fig. 5 Waveforms and two-dimensional spectra with failure of first and secondary interfaces

从图 5(a)可以看到,2 个界面同时窜槽时,产生了一个速度接近钢套管纵波速度的振铃信号,这是指示第一界面窜槽了的沿着钢套管传播的振铃信号,但是与图 4(a)略有不同,由于第二界面同时窜槽的影响,伪瑞利波叠加到前面的振铃信号上,造成波形复杂化,另外它的波形振动频率要低很多.从二维谱分布图(图 5(b))可以看到,相速度与钢套管纵波速度的耦合变形很明显,一阶模式在波数为 1~2 的地方发生了错位,并且从一开始就分成 2 个部分,一部分起始于 7~8 kHz,另一部分起始于 10~11 kHz;二阶模式变得很大,但形状很不规则.总体来讲,2 个界面同时窜槽时,第一界面窜槽造成的影响是主要的,第二界面窜槽造成的影响是次要的,但是可以分辨的.

3 结 论

a. 2 个界面胶结良好时,接收声波不会含有振铃信号,声波信号主要为地层横波和斯通利波,第一界面发生窜槽时,会产生一个沿着钢套管传播的振铃信号;第二界面发生窜槽时,会产生沿着钢套管和水泥层双层复合体传播的伪瑞利波信号.2 个界面同时窜槽时,能接收到一个由第一界面窜槽产生的振铃信号与第二界面窜槽产生的伪瑞利波叠加的声波,它波形复杂,波形振动频率较低.

b. 对于非刚性管壁井孔,井内传播模式会与井外地层传播模式耦合变形.界面胶结良好时,一阶模式会在波数为 3 左右处发生分叉;第一界面或(和)第二界面窜槽时,一阶模式从开始就被分成 2 部分,并且由于窜槽造成耦合不良而发生错位.

参考文献:

[1] 张宏兵,黄宝华,陶宏根,等.利用声波变密度测井检测第二界面固井质量[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(5):552-556.(ZHANG Hong-bin, HUANG Bao-hua, TAO Hong-gen, et al. Detecting cementing quality of secondary interface by using acoustic variable density logging[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(5): 552-556. (in Chinese))

- [2] 张宏兵,顾敏智,唐达方,等.基于声波变密度测井的固井质量综合评价方法[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(6):690-694.(ZHANG Hong-bin, GU Ming-zhi, TANG Da-fang, et al. A comprehensive evaluation method for cementing quality based on acoustic variable density logging[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(6):690-694.(in Chinese))
- [3] 刘继生,王克协.用频率-波数分析研究声波测井全波列的各相波[J].测井技术,2000,24(3):198-202.(LIU Ji-sheng, WANG Ke-xie. To study each mode of acoustic full-wave trains using frequency-wavenumber analysis[J]. Well Logging Technology, 2000, 24(3):198-202.(in Chinese))
- [4] BIOT M A. Propagation of elastic waves in a cylindrical bore containing a fluid[J]. Appl Phys, 1952, 23:997-1005.
- [5] WHITE J E, ZECHMAN R E. Computed response of an acoustic logging tool[J]. Geophysics, 1968, 33:302-310.
- [6] CHENG C H, TOKSOZ M N. Elastic wave propagation in a fluid filled borehole and synthetic logs[J]. Geophysics, 1981, 46:1042-1053.
- [7] 胡文祥,钱梦录.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.(HU Wen-xiang, QIAN Meng-lu. Synthetic waveforms of the acoustic field in cased boreholes and their time-frequency distribution[J]. Acta Acoustica, 2002, 27(3):223-228.(in Chinese))
- [8] ZHANG Hai-lian, LI Ming-xuan. Numerical study of acoustic field of borehole in slow formation[J]. Geophysics, 1993, 36:137-144.
- [9] BAKER L J, WINBOW G A. Multipole P-wave logging in formations altered by drilling[J]. Geophysics, 1988, 53:1207.
- [10] TUBMAN K M, CHENG C H, TOKSOZ M N. Synthetic full wave acoustic logs in cased boreholes[J]. Geophysics, 1984, 49:1051-1059.
- [11] 沈建国,张海澜.井内偏心声源激发的三维声场的数值模拟研究[J].地球物理学报,2000,43(2):279-286.(SHEN Jian-guo, ZHANG Hai-lan. Numerical study on 3D acoustic field generated by eccentric sources in borehole[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(2):279-286.(in Chinese))
- [12] 林伟军.带扇形窄槽的非轴对称固井声场研究[D].北京:中国科学院研究生院,2004.
- [13] STEPHEN R A, PARDO-CASAS F, CHENG C H. Finite difference synthetic acoustic logs[J]. Geophysics, 1985, 50:1588-1609.
- [14] 张海澜,王秀明,张碧星.井孔的声场和波[M].北京:科学出版社,2004.

Characteristics of acoustic fields in axially symmetric cased boreholes

QI Zheng-gui, ZHANG Hong-bing

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to provide a basis for the evaluation of the cementing quality of the cement in cased boreholes, the acoustic fields with various cementing cases were studied using real axis integration. The test results show that if the first interface fails, a bell signal will propagate along the casings. If the secondary interface fails, a pseudo-Rayleigh signal propagates in the structural compound of the casings and cement annuluses. When the two interfaces fail, a bell signal will emerge, and its velocity will approximately equals that of the P-wave in the steel casings. However, its vibration frequency will be much smaller. The coupling deformation in two-dimensional spectra is different with regard to different cementing cases.

Key words: cased borehole; acoustic logging; real axis integration; first interface; secondary interface; two-dimensional spectrum