

利用声波变密度测井检测第二界面固井质量

张宏兵¹, 黄宝华², 陶宏根², 尚作萍¹, 马 俊³, 王克协³

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国石油天然气总公司大庆测井公司, 黑龙江 大庆 163412;
3. 吉林大学物理系, 吉林 长春 210016)

摘要 :从理论正演数值模拟、刻度井试验资料 and 实际生产井时间推移测井资料 3 个方面,探索用变密度(VDL)波形评价第二界面胶结质量的方法,提取反映第二界面的胶结状况的特征量.分析结果表明,第一界面胶结良好,而第二界面窄槽的初至波到时总是延迟于第一界面窄槽的初至波,但却比地层波早,其幅度明显小于第一界面窄槽的初至波,但比全胶结的幅度大.这一结果已在试验和部分实际生产资料中得到验证.

关键词 固井质量 第二界面 声波变密度 VDL

中图分类号 :TE357.8

文献标识码 :A

文章编号 :1000-1980(2006)05-0552-05

油田在后期开发时,为提高采收率,多采用注水开发.注水开发可能会使地层内部结构发生变化,影响套管井的固井质量,出现第一、第二界面窄槽问题.为了制订合适的油层开发方案,必须将胶结良好与发生窄槽的套管井段区分开来.

评价固井质量的方法——水泥胶结测井技术^[1]经历了半个世纪的发展,已由最初的声幅(CBL)测井一种方法发展为现在的声波变密度、MAK-2、SBT 和 CAST 等多种测井方法^[2],其中声波变密度(CBL/VDL)测井已经在实际生产中得到大面积推广^[3].声波变密度测井技术是 20 世纪六七十年代发展起来的,其方法原理简单,而解释方法复杂多样^[2].该测井解释方法的研究主要集中在两方面,即第一和第二界面的固井质量评价问题.目前国内外针对第一界面评价研究的成果较多,而第二界面研究相对滞后.从油田开发实际情况来看,在第一界面胶结良好的井段进行射孔,会因第二界面胶结差引起部分地层间流体窄槽.因此,研究第二界面胶结质量的评价方法是一项不可忽视的工作.

有关套管井声场理论研究的文献始见于 20 世纪 80 年代初.Cheng 等^[4-5]进行了合成全波波形的研究;Tubman 等^[6]探讨了胶结良好的套管井的声传播问题,但对第一、第二界面窄槽问题针对性不强;张海澜等^[7-9]等利用实轴积分法模拟了居中或偏心声源激发的声场;刘继生等^[10]提出第二界面胶结差的全波列初至波为复模式波,其速度介于套管波与地层波之间;胡文祥等^[11]通过分析套管井全波的时频特征,提出通过分析地层信号的存在与否来评价第二界面胶结状况的方法;林伟军等^[12]使用 2.5 维有限差分算法对带扇形窄槽的套管井孔声场进行了数值研究;汪天波等^[13]根据声变测井资料提出一种能量分析法,以计算套管波和地层波能量参数,进而评价第一、第二界面的胶结状况.这些研究作为定性或定量评价第二界面的胶结状况打下了良好的理论基础.

本文从正演数值模拟、刻度井试验资料 and 实际生产井时间推移测井实测资料 3 个方面,拟在变密度波形中寻找反映第二界面胶结状况的特征量,以探讨第二界面的定量解释方法.数值模拟结果显示,第二界面胶结差的变密度波形在时间和幅度上都有差异,这一结果在刻度井试验资料 and 实际生产井资料中都得到了验证.

1 声压场正演模拟方法

1.1 柱源下的声压场

本文采用双重傅立叶积分计算井孔声压场.对于本文使用的声系井眼模型,居中放置的声源在井孔中激发的声压场可以表示为

$$P(r,z,t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(r,l,\omega) U(l) F(\omega) e^{i\omega t} e^{-ilz} dl d\omega \tag{1}$$

式中： r, z, t ——描述空间位置的柱坐标和时间； l, ω ——轴向波数和圆频率； $U(l), F(\omega)$ ——声源的空间分布函数和时间函数的 Fourier 变换； $R(r, l, \omega)$ ——地层滤波函数或系统频率响应函数，其具体形式与井孔和井孔外各层介质模型有关。一旦声源确定后，则函数 $F(\omega)$ 和 $U(l)$ 就为已知。

本文的声源时间函数为余弦包络脉冲，其频谱为

$$F(\omega) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin\pi t_c(f+f_0)}{f+f_0} + \frac{\sin\pi t_c(f-f_0)}{f-f_0} + \frac{\sin\pi t_c(f+f_0+1/t_c)}{2(f+f_0+1/t_c)} + \frac{\sin\pi t_c(f-f_0-1/t_c)}{2(f-f_0-1/t_c)} + \frac{\sin\pi t_c(f+f_0-1/t_c)}{2(f+f_0-1/t_c)} + \frac{\sin\pi t_c(f-f_0+1/t_c)}{2(f-f_0+1/t_c)} \right] \tag{2}$$

式中： f_0 ——声源的中心频率； t_c ——脉冲的时间宽度，与声源的频带密切相关。对于柱源，其空间函数的 Fourier 变换为

$$U(l) = 2z_0 \frac{\sin lz_0}{lz_0} \tag{3}$$

式中 z_0 为柱源的高度。下面给出地层滤波函数 $R(r, l, \omega)$ 的计算方法。

1.2 地层滤波函数

以水泥胶结良好及最外层为半无限地层的情况为例，确定地层滤波函数 $R(r, l, \omega)$ 。此时，各固体介质层中质点的位移和应力可以用势函数表示为

$$S^i = H^i \cdot X^i$$
$$S^i = (u_r^i, u_z^i, \tau_{rr}^i, \tau_{rz}^i)^T \quad X^i = (X_1^i, X_2^i, X_3^i, X_4^i)^T \tag{4}$$

式中： u, τ ——位移和应力； $i = 2, 3, 4$ ——钢管、水泥和地层； S^i ——位移应力矢量； X^i ——系数矢量； H^i ——第 i 层介质的系数矢量与位移应力矢量的转换矩阵，是一 4×4 阶复矩阵，矩阵元的具体形式为

$$\begin{bmatrix} mI_1(mr) & -mK_1(mr) & ilI_1(kr) & -ilK_1(kr) \\ ilI_0(mr) & ilK_0(mr) & -k^2I_0(kr) & -k^2K_0(kr) \\ \mu^* \left[n^2I_0(mr) - \frac{2mI_1(mr)}{r} \right] & \mu^* \left[n^2K_0(mr) + \frac{2mI_1(mr)}{r} \right] & 2il\mu^* \left[k^2I_0(kr) - \frac{kI_1(kr)}{r} \right] & 2il\mu^* \left[k^2I_0(kr) + \frac{kI_1(kr)}{r} \right] \\ 2ilm\mu^* I_1(mr) & -2ilm\mu^* K_1(mr) & -k(l^2+k^2)\mu^* I_1(kr) & k(l^2+k^2)\mu^* K_1(kr) \end{bmatrix} \tag{5}$$
$$n^2 = l^2 + k^2$$

式中： μ^* ——Lame 系数； m, k ——纵、横波的径向波数； I_0, K_0, I_1, K_1 ——各阶 Bessel 函数。对于实际的物理过程， H^i 为非奇异矩阵，其逆矩阵总是存在的。

在固体-固体边界，介质位移和应力连续，其边界条件为 $S^i = S^{i+1}, i = 2, 3$ 。在无限远处的声势为有限值，故 X_1^4, X_3^4 均为零。在泥浆与套管界面上边界条件为

$$u_r^1(r_2) = u_r^2(r_2) \quad -p_r^1(r_2) = \tau_{rr}^2(r_2) \quad 0 = \tau_{rz}^2(r_2) \tag{6}$$

对于柱源，在 $r = r_1$ 处，

$$u_r^1 = u_0 = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(l) F(\omega) e^{i(\omega t - lz)} dl d\omega \tag{7}$$

式中 u_0 为声源函数。

综上所述，利用各界面的连接条件，可以由 12 个方程构成一个如 $AX = B$ 的方程组。其中： A 是 12×12 的系数矩阵； $X = (X_1, X_2, \dots, X_{12})^T$ ； $B = (1, 0, \dots, 0)^T$ 。这样就可以求解待定系数 X_i ，从而得到地层的滤波函数 $R(r, l, \omega)$ 。至此，式(1)中各函数或变量都已经确定，通过 2 次 Fourier 逆变换，可以获得声压场的离散值 $P(r, z, t)$ 。

2 套管井中声波全波列的数值模拟

为了认识不同胶结状况下声波变密度测井全波列的特点，首先从正演数值模拟入手，在全波列中寻求能够反映第二界面胶结质量的特征量。

2.1 模型的建立

采用柱状多层介质模型(图 1)来模拟井内声场.从井轴向外介质依次为井内流体、套管、水泥环和地层,第一或第二界面窄槽设为水泥环两侧各有 10 mm 的吸声橡胶,地层外为清水.模型中各介质层声学参数和内半径见表 1 和表 2.

2.2 数值模拟结果

针对上述物理模型,采用式(1)计算声压场.选用的源为柱源——局部震动的无限长刚性柱.声源的中心频率为 20 kHz,发射脉冲长度为 0.2 ms.源距为 1.5 m 的声波变密度全波列数值模拟结果见图 2.从图中可以看出,4 种胶结状况的波形有明显差异,主要体现为初至波到达时间和幅度不同.

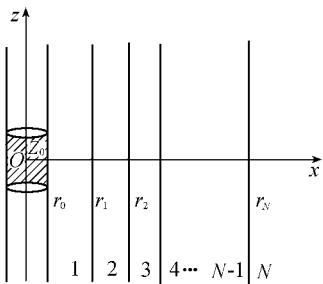


图 1 柱状多层介质模型

Fig.1 Axisymmetric multilayered medium model

表 1 模型中各介质层声学参数

Table 1 Acoustic parameters of mediums in model					
各介质层	密度/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	纵波声速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	纵波吸收 系数/ 10^{-6}	横波声速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	横波吸收 系数/ 10^{-6}
井孔泥浆	1.09	1580	10		
钢管	7.50	6098	3	3354	5
水泥	1.92	2800	9	1700	5
窄槽水层	1.09	1580	10		
地层	2.60	3800	50	2200	50
外围水	1.09	1580	10		

表 2 模型中各介质层内半径

Table 2 Inner radius of mediums in model							m
胶结 情况	1 介质层 内半径	2 介质层 内半径	3 介质层 内半径	4 介质层 内半径	5 介质层 内半径	6 介质层 内半径	
自由套管时	0.02	0.0625	0.07	0.10	0.4		
第一界面窄槽时	0.02	0.0625	0.07	0.08	0.1	0.4	
第二界面窄槽时	0.02	0.0625	0.07	0.09	0.1	0.4	
胶结良好时	0.02	0.0625	0.07	0.10	0.4		

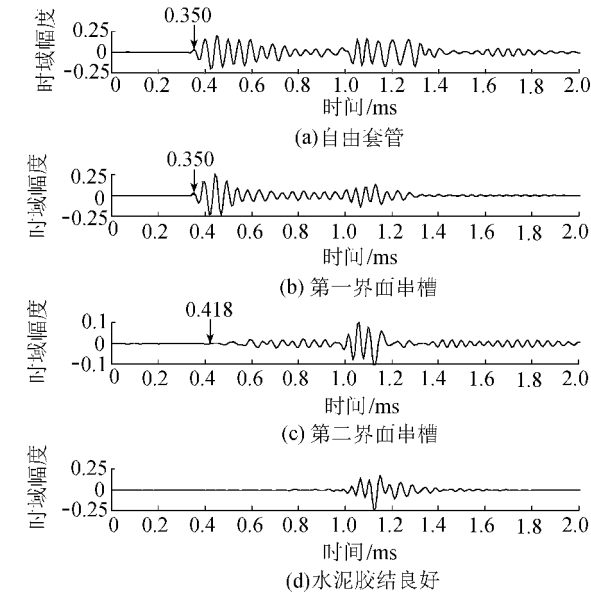


图 2 不同胶结情况下的全波列正演模拟结果

Fig.2 Numerical results of full-waveform under various cementing conditions

槽厚度 d_2 (等效于不同角度的水泥缺失) 对初至波的影响,见图 3.从图中可以看出,当 d_2 由 5 mm 增大到 20 mm 时,初至波的幅度也逐渐增大,而到时却逐渐减小,但都比套管波的到时大.这种变化规律与第一界面窄槽时的情况类似,可为定量评价第二界面胶结质量提供依据.

3 刻度井中声波全波列的试验

刻度井试验资料与理论模型的数值模拟结果有相似的特征.本文的试验是在大庆油田刻度井群中进行的.在试验中,分别对胶结良好、第一界面窄槽($90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ 水泥缺失)、第二界面窄槽($45^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 水泥缺

a. 对初至波到时的考察.当第一界面窄槽或自由套管时,初至波即为套管波.初至波到时很早,大约 0.35 ms,基本反映的是钢套管的信息.当第二界面窄槽时,初至波到时比第一界面窄槽时晚约 0.068 ms.若水泥胶结良好,初至波到时更晚,并随着地层声速而发生变化,主要反映地层的信息.

b. 对幅度的考察.4 种情况下的波形在幅度上也有明显的不同.第一界面窄槽的波形与自由套管的波形非常相似,其中套管波占据了传播能量的很大成分,而传递地层信息的波包变得比较模糊.当第二界面窄槽时,初至波与后至的波包幅度比第一界面窄槽时小,而比水泥胶结良好时大.

此外,本文还考察了不同的第二界面窄

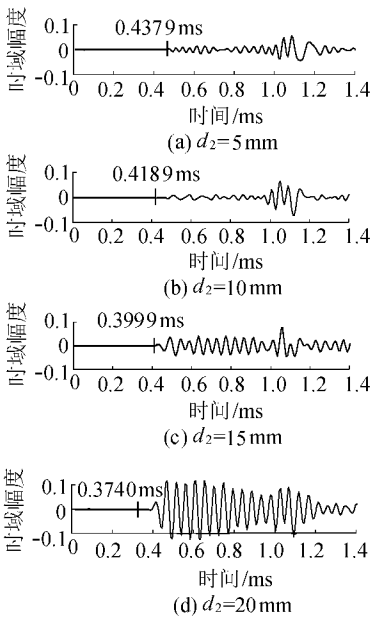


图 3 第二界面窄槽厚度对全波列的影响

Fig.3 Influences of slot thickness of secondary interface on full-waveform

失)、自由套管等情况进行了测量.图 4 为刻度井群中几种胶结状况的声波全波列波形,其中第一和第二界面窄槽都为 180°水泥缺失.图中初至波到时和幅度与数值模拟结果一致,波形特征比较吻合,两者波形对比见图 5.

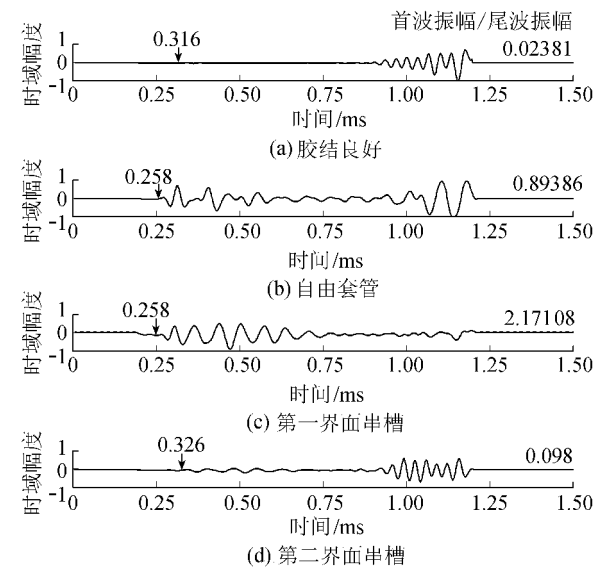


图 4 刻度井中不同水泥胶结情况的试验结果

Fig.4 Experimental results under different cementing conditions in calibration pits

4 实测的声波全波列资料分析

经过数值模拟和分析刻度井实测资料波形,可以初步得出固井第二界面胶结质量的好坏在全波列波形中有显示这个结论.但该观点需要现场实测资料的检验.为此,对野外实测资料进行了分析,并在一些套管井声变测井资料中见到文中反映的第二界面窄槽的波形特征,如大庆油田南 3-丁 3-水 453 井声变时间推移测井(图 6).图 6 第 2,3 和 4 道中的 3 个波形图是同一口井 3 次测井结果,测井时间分别为固井后第 2,7 和 15 天.在固井后第 2 天测井时,第一和第二界面胶结质量总体是好的(除了 905 m 和 918 m 2 处外).在第 7 天测量的波形中,877 ~ 883 m 井段的初至波为套管波,表示第一界面胶结差.883 m 以下井段的初至波到时比上面井段晚,而明显比地层波早,可以推断是由于第二界面胶结差引起的.第 15 天测量的波形与第 7 天的有相同特征,只是出现套管波的井段扩大了.这些波形变化特征与数值模拟和刻度井试验资料基本一致.因此,通过套管波和地层波之间的波形特征信息,可以得出

883 ~ 919 m 井段第二界面胶结质量较差,870 ~ 883 m 井段第一和第二界面胶结质量都比较差的结论.

综合对比 3 次测井结果还可以发现,在 870 ~ 919 m 井段,随着时间的推移,固井质量逐渐变差.在固井后第 2 天测井时,第一和第二界面胶结质量都比较好.到第 7 天,877 ~ 883 m 井段第一界面胶结质量变差,883 ~ 919 m 井段第二界面胶结质量变差.第 15 天,883 m 以上第一界面胶结质量变差的井段扩大,883 m 以下井

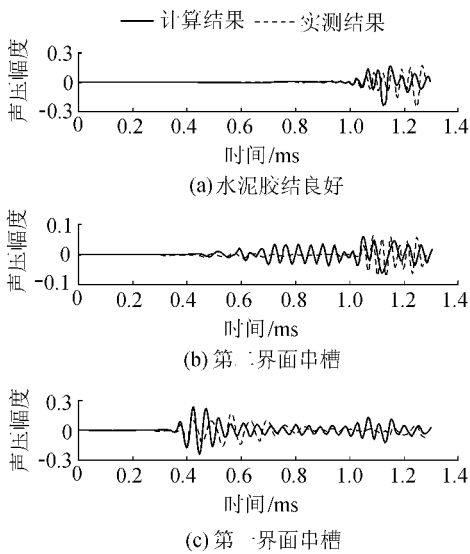


图 5 数值模拟结果与刻度井试验结果的对比

Fig.5 Comparison of numerical results with the experimental data of calibration pits

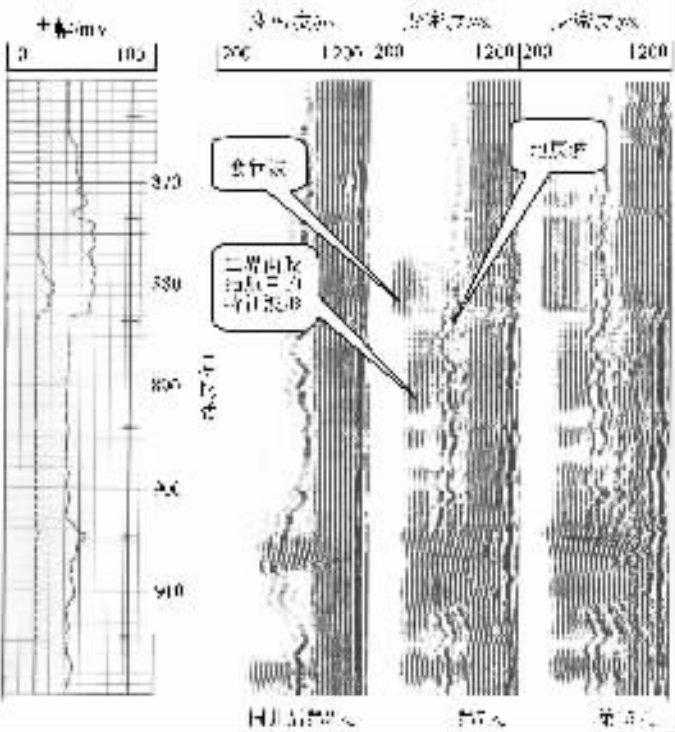


图 6 声波变密度时间推移测井的变密度波形资料

Fig.6 VDL waveforms from time-elapsing acoustic variable density logging

段基本不变。

5 结 语

a. 数值模拟结果和刻度井试验结果显示,第二界面窜槽时的全波列初至波到时和幅度与第一界面窜槽或全胶结时的有较大差异。在到时时,第二界面窜槽的初至波到时时在 $0.41 \sim 0.45$ ms 之间,总是比第一界面窜槽的延迟了约 0.068 ms,但却比地层波早,这个规律和波形相位特征基本不受地层波速的影响。在幅度上,第二界面窜槽的初至波幅度明显比第一界面窜槽的小,但比全胶结的大。如果以初至波与管波的幅度比作为区分3种胶结情况的标志,效果会更明显。

b. 正演模拟和试验结果显示的特征,在部分实际生产资料中得到了验证,解释了以往生产资料评价中出现的疑惑。为此,在第一界面胶结良好的情况下,可以依据 $0.41 \sim 0.45$ ms 时窗内的波形幅度值定性或定量评价第二界面水泥胶结质量。此外,在实际固井质量评价过程中,需要考虑固井质量随时间变化的特征。

参考文献:

- [1] 楚泽涵. 声波测井原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 1-8.
- [2] 薛梅, 楚泽涵, 李艳华, 等. 对固井质量解释评价若干问题的探讨[J]. 测井技术, 2000, 24(6): 470-475.
- [3] 陶宏根, 张宏兵, 侯春会, 等. 发展固井质量检测技术满足油田勘探开发需求[J]. 测井技术, 2004, 28(S1): 9-12.
- [4] CHENG C H, TOKSOZ M N. Elastic wave propagation in a fluid-filled borehole and synthetic acoustic logs[J]. Geophysics, 1981, 46: 1042-1053.
- [5] BAKER L J. Effects of the invaded zone on the full wavetrain acoustic logging[J]. Geophysics, 1984, 49: 796-809.
- [6] TUBMAN K M, CHENG C H, TOKSOZ M N. Synthetic full-waveform acoustic logs in cased borehole[J]. Geophysics, 1984, 49: 1051-1059.
- [7] 张海澜, 王秀明, 应崇福. 弹性介质中充液井孔的漏模和井孔声场中的分波计算[J]. 中国科学: A 辑, 1995, 25(7): 742-752.
- [8] 沈建国, 张海澜. 井内偏心声源激发的三维声场的数值研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(2): 279-286.
- [9] 宋立军, 马俊, 王克协. 首波、模式波及井孔全波时域波列的数值模拟与分析[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 2005, 37(2): 50-54.
- [10] 刘继生, 王克协. 用频率-波数分析研究声波测井全波列的各波相[J]. 测井技术, 2000, 24(3): 198-202.
- [11] 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.
- [12] 林伟军, 张澄宇, 张海澜, 等. 带扇形窜槽的套管井声场[J]. 声学学报, 2005, 30(1): 9-14.
- [13] 王天波, 刘正锋, 张宇晓, 等. 声幅、变密度测井定量评价固井质量的研究[J]. 测井技术, 2002, 26(1): 55-59.

Detecting cementing quality of secondary interface by using acoustic variable density logging

ZHANG Hong-bing¹, HUANG Bao-hua², TAO Hong-gen², SHANG Zuo-ping¹, MA Jun³, WANG Ke-xie³

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Daqing Well Logging Company, CNPC, Daqing 163412, China;

3. Department of Physics, Jilin University, Changchun 210016, China)

Abstract Based on the theoretical numerical simulation, experimental data of calibration pits, and time-elapsing logging data in cased production pits, a study is made for searching an evaluation method for cementing quality of the secondary interface by variable density logging (VDL), and the eigenvalue about the cementing quality of the secondary interface is obtained. Comprehensive analysis shows that, the primary wave travel-time under the satisfactory first interface and the secondary interface with slot is always longer than that under the first interface with slot, but is shorter than that of the formation wave, while the primary wave amplitude under the secondary interface with slot is smaller than that under the first interface with slot, but is larger than that under fully cementing condition. The conclusions are verified by experimental results and some field data.

Key words cementing quality; secondary interface; acoustic variable density; VDL