

· 研究报告 ·

# 宽带相控线阵声源在套管井外地层 辐射声场的指向性<sup>\*</sup>

陈雪莲<sup>1†</sup> 吴金平<sup>2</sup>

(1 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院 青岛 266580)

(2 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249)

**摘要** 套管井中的声传播涉及到波在柱状多层介质中的传播问题。通过数值计算对比了宽带相控线阵声源在套管井外均匀地层中产生的纵横波声场的指向性。结果表明,在任意胶结状况下,均可实现向套管井外地层定向辐射纵横波的技术;与地层中纵波的传播特征不同的是在主瓣偏转角方向横波幅度随着偏转角的增大逐渐增加,且在主瓣辐射方向的横波幅度受套管井胶结状况的影响较纵波小;采用玻璃钢套管代替钢套管,会进一步减弱地层声场受胶结状况的影响,这有利于实现在套管井外地层较大范围内的精确定向辐射声波的技术。

**关键词** 套管井, 相控线阵声源, 指向性, 胶结

中图分类号: P631

文献标识码: :A

文章编号: 1000-310X(2014)02-0145-09

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2014.02.008

## Directivity of acoustic fields in the formation excited by the broadband linear phased-array source through casing

CHEŃ Xuelian<sup>1</sup> WU Jinping<sup>2</sup>

(1 School of Geosciences & Technology, China University of Petroleum, Shandong 266580, China)

(2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract** The application of linear phased-array transmitter in a cased borehole relates to wave propagation in cylindrical multilayered medium. Aimed at the engineering requirements of measurement of formation acoustic properties through casing, acoustic fields of near-borehole formation excited by the broadband linear phased-array source (LPAS) in cased boreholes with different bonding conditions were simulated using the real axis integration method. Numerical results show that the main lobe steered angle in the formation can be controlled by adjusting the delay time between the neighboring array elements in both well-bonded or poorly-bonded conditions. It is different from the compressional wave radiation pattern that the shear wave amplitude in the steered direction can be strengthened gradually with the main lobe steered angle increasing and the radiated

2013-08-12 收稿; 2013-12-31 定稿

\* 国家青年自然科学基金资助项目(40804020)

作者简介: 陈雪莲(1976- ), 女, 河北衡水人, 副教授, 研究方向: 声波测井方法及岩石物理。

吴金平(1984- ), 男, 博士研究生。

<sup>†</sup>通讯作者: 陈雪莲, E-mail: chenxl@upc.edu.cn

energy to the formation is affected little by cemented conditions. The application of the glass case with lower acoustic impedance can decrease the influencing extent of the cemented conditions further and improve the technique of the directional radiating acoustic field to the formation at bigger angles.

**Key words** Cased well, Linear phased-array source, Directivity, Cement

## 1 引言

由于在套管井中现有的单极子声波测井探头辐射的声波经过套管、水泥等形成的径向多层介质后,辐射到地层中的能量较低,影响了对套管井外地层构造的探测能力。窦伟坦等<sup>[1]</sup>利用偶极子声波测井激发的弯曲波对套管外压裂缝或声阻抗不连续界面的检测做了尝试,但利用井孔模式波(弯曲波)评价井旁地质构造,限制了其径向检测深度<sup>[2]</sup>;且不能完成裂缝或声阻抗不连续界面高度和深度的“二维”检测。本文将具有声束聚焦和动态可控技术的相控线阵声波测井辐射器应用于套管井反射声波测井,为套管井外地层声阻抗不连续界面的识别提供新的方法和思路。

目前,相控线阵声源在声波测井中的应用研究主要集中在裸眼井中(法林等<sup>[3]</sup>,1999;张海澜等<sup>[4]</sup>,2000;乔文孝等<sup>[5]</sup>,2002;车小花等<sup>[6]</sup>,2004)。相控线阵声源在套管井声波测井中的应用研究也局限在地层纵横波速度的提取<sup>[7]</sup>。本文进一步深化相控线阵声源在套管井中的应用研究,考察其在套管井反射声波测井中的工程适用性问题。陈雪莲等初步研究了相控线阵声源做发射器在套管井外地层中产生的纵波声场<sup>[8]</sup>,本文以现场声波测井探头的工作状态为参考,进一步分析了相控线阵声源相邻阵元间延迟时间变化时在套管井外地层中产生横波声场;通过纵横波声场的对比,对相控线阵声源辐射的声波透过套管、水泥等多层介质后在地层中的传播规律有了较清晰的认识,并进一步讨论了套管类型、胶结状况以及辐射主瓣偏转角对地层纵横波声场指向性的影响。验证了在任意胶结状况下实现向套管井外地层中定向辐射纵横波技术的可行性,为利用套管井中的反射波(纵波、或横波、或转换波)反演套管井外声阻抗不连续界面提供理论基础,这将大大提高对套管井外复杂地质构造的识别能力。

## 2 理论研究模型

### 2.1 套管井模型描述

图1是套管井的平面示意图,建立  $r\theta z$  柱坐标系,其  $z$  轴与井孔中心轴重合,  $r$  轴沿井的径向。介质层从内到外编号,中心的流体为0,最外面的地层是  $N$ ,它延伸到无穷远。所有层的界面都是以井轴为中心的圆柱面。由  $m$  个点源组成的相邻阵元间距为  $d$  的相控线阵声源位于井轴上,其中心与井轴重合。套管的内外半径分别是 0.07 m 和 0.08 m,井壁半径为 0.1 m。在以相控线阵声源为中心,半径 3 m 的半圆周上,均匀放置 61 个接收器,两个相邻接收器对声源中心的张角为 3°。 $\alpha$  是辐射方向与声源所在位置的径向方向之间的夹角。通过接收器接收的波形分析相控线阵声波测井辐射器在井外均匀地层的声场分布。各层介质的弹性/声学参数见表1。

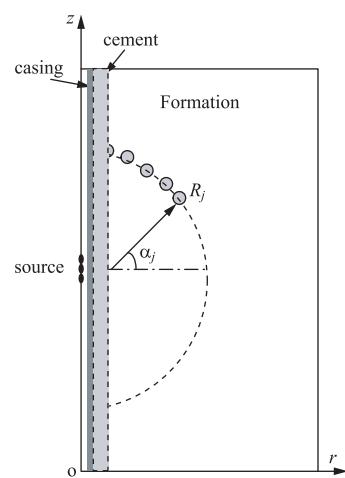


图1 数值模型结构示意图

Fig. 1 Scheme of numerical modeling

井内声场满足流体的声波方程,且流体中只有一个位移势为

$$\varphi_f = H_0^{(1)}(\alpha_0 r) + A_0(k, \omega) J_0(\alpha_0 r), \quad (1)$$

**表1 地层、套管、水泥层以及井内流体的弹性/声学参数**  
**Table 1 The acoustic parameters of the cased-hole model**

参数	纵波速度(m/s)	横波速度(m/s)	密度(kg/m <sup>3</sup> )
地层	4000	2300	2500
钢套管	6098	3354	7500
玻璃钢套管	2720	1650	2200
水泥	2823	1729	1920
流体	1500	—	1000

式中第一项代表声源发出的直达波,第二项代表是井壁的反射波; $\alpha_0 = \left(\frac{\omega^2}{v_f^2} - k^2\right)^{1/2}$  是径向波数,系数  $A_0$  是  $k$  和  $\omega$  的函数,由井壁界面处的边界条件确定。若井外第  $n(0 < n < N)$  层介质是固体,声场满足弹性波方程。因每一层既要考虑从层外传播进来的波,又要考虑向层外辐射出去的波,需引入两个位移势  $\varphi_n$  和  $\eta_n$  表示其中的位移和相应的应力, $\varphi_n$  和  $\eta_n$  分别为

$$\varphi_n(r, k, \omega) = A_n(k, \omega) H_0^{(1)}(\alpha_n r) + B_n(k, \omega) H_0^{(2)}(\alpha_n r), \quad (2)$$

$$\eta_n(r, k, \omega) = C_n(k, \omega) H_0^{(1)}(\beta_n r) + D_n(k, \omega) H_0^{(2)}(\beta_n r), \quad (3)$$

式中, $\alpha_n = \left(\frac{\omega^2}{v_{pn}^2} - k^2\right)^{1/2}$  和  $\beta_n = \left(\frac{\omega^2}{v_{sn}^2} - k^2\right)^{1/2}$  分别是纵波径向波数和横波径向波数, $A_n$ 、 $B_n$ 、 $C_n$  和  $D_n$  是  $k$  和  $\omega$  的待定函数。式(2)和(3)中  $H_0^{(1)}$  和  $H_0^{(2)}$  两项分别表示扩散波和汇聚波。第  $N$  层介质中只有扩散波,两个位移势分别为

$$\varphi_N(r, k, \omega) = A_N(k, \omega) H_0^{(1)}(\alpha_N r), \quad (4)$$

$$\eta_N(r, k, \omega) = C_N(k, \omega) H_0^{(1)}(\beta_N r). \quad (5)$$

若井外第  $n(0 < n < N)$  层介质是流体,只要一个位移势  $\varphi_n$  就足以表示其中声压和位移,位移势满足流体声波方程,位移势  $\varphi_n$  为

$$\varphi_n(r, k, \omega) = A_n(k, \omega) H_0^{(1)}(\alpha_n r) + B_n(k, \omega) H_0^{(2)}(\alpha_n r). \quad (6)$$

在相邻两层的界面上声场应满足边界条件。由于套管井具有多个环形结构,在求解位移势系数时,需要运用传递矩阵的方法,得到最外层系数与井中流体的联合方程。

井外地层中的纵横波声场可表示为

$$\phi_N(r, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} U(k, \omega) \times \varphi_N(r, k, \omega) e^{i(kz - \omega t)} dk d\omega, \quad (7)$$

$$\eta_N(r, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} U(k, \omega) \times \eta_N(r, k, \omega) e^{i(kz - \omega t)} dk d\omega, \quad (8)$$

式中, $U(k, \omega)$  为声源的二维谱,本文计算的声场是用纵横波的位移势表示的。

## 2.2 相控线阵声源

由于套管井声波测井的井孔声场传播涉及到分层介质中的声传播规律研究,在把相控线阵声源由裸眼井扩展到套管井时,为精确地观察相控线阵辐射声束的偏转角与其在井外地层中产生的声场之间的关系,在设计相控线阵声源时,要求辐射声束主瓣角尽可能的窄,旁瓣级也尽可能低。这里选择了由 13 个阵元组成的相控线阵声源,相邻阵元间的间距  $d$  为 6 cm, 声源的激发主频为 20 kHz。13 个点源组成的相控线阵声源的表面位移是

$$u(z, t) = \begin{cases} u_0(t + n\tau) & z = n \times d \quad n = 0, 1, \dots, 6 \\ u_0(t - n\tau) & z = -n \times d \quad n = 1, \dots, 6 \\ 0 & |z| \neq n \times d \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\tau$  是相邻两个阵元激励信号的延迟时间, $u_0(t)$  是已知的单个阵元的振动函数,本文选用了瑞克子波(Ricker wavelet),则可以得到声源的二维谱

$$U(k, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(z, t) \exp(-ikz + i\omega t) dz dt. \quad (10)$$

相邻阵元间激励信号的延迟时间  $\tau$  与主瓣偏转角  $\theta$  之间的关系满足:

$$\tau = \frac{ds\sin\theta}{c}, \quad (11)$$

式中  $c$  是波所在介质的声速。

### 3 数值计算结果与分析

#### 3.1 套管井胶结良好

(1) 胶结良好情况下点声源和相控线阵声源在井外地层产生的横波声场

图 2 表示了点声源和相控线阵声源分别工作

时, 在套管井外地层 61 个接收器接收的横波波形, 激发主频是 20 kHz。由点声源(图 2(k)中 point)在地层中产生的声场可知, 在  $0^\circ$  附近, 横波能量最弱, 随着角度的逐渐增加, 横波幅度逐渐增强, 这与界面处横波透射系数相关。由图 2(a) ~ (j) 可见随着相控线阵声源相邻阵元间激励信号的延迟时间逐渐增加, 辐射横波主瓣(图中椭圆区域内)偏转角逐渐增大, 与纵波声场<sup>[9]</sup>不同的是, 在  $\pm 90^\circ$  附近横波幅度始终较大。

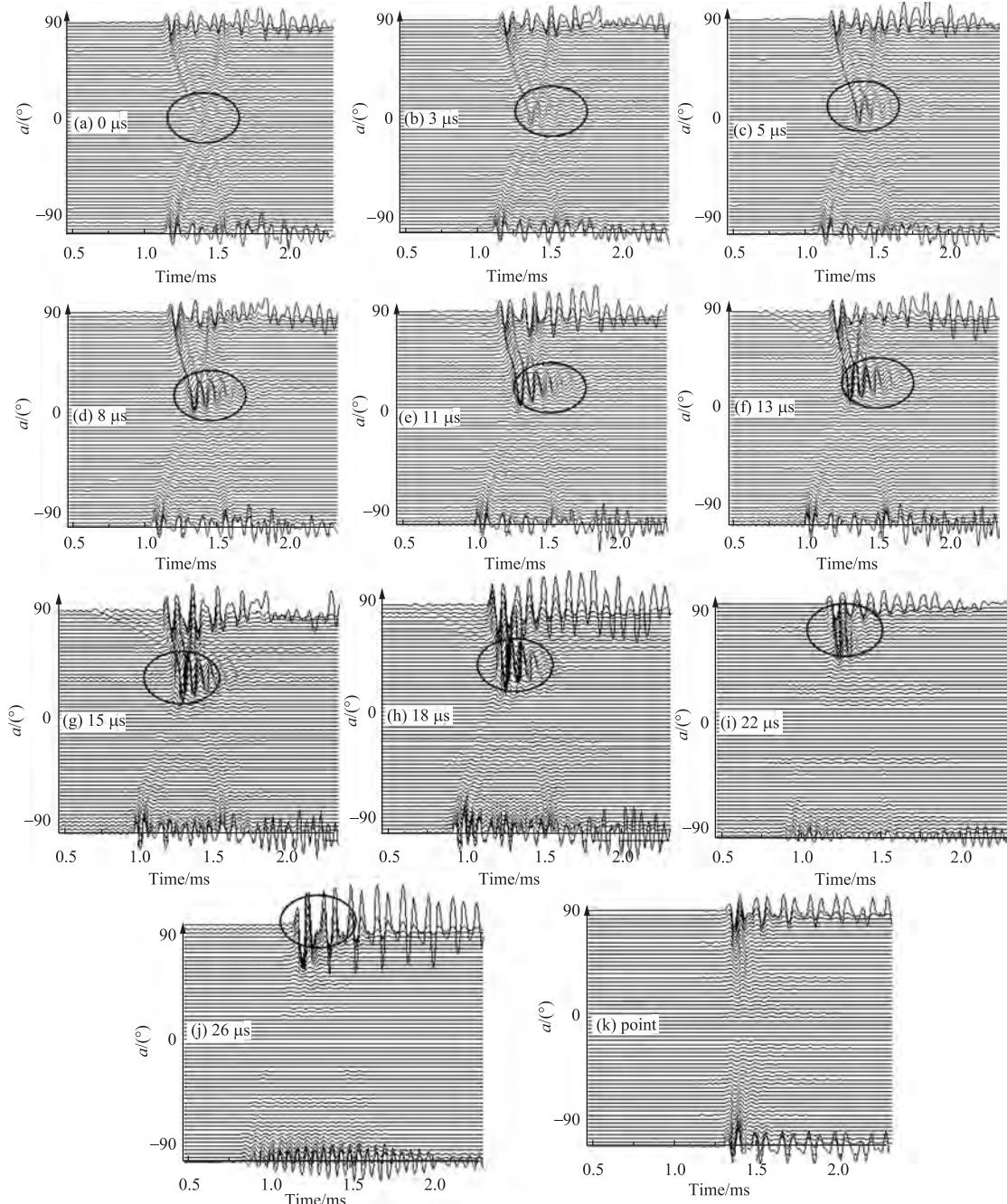


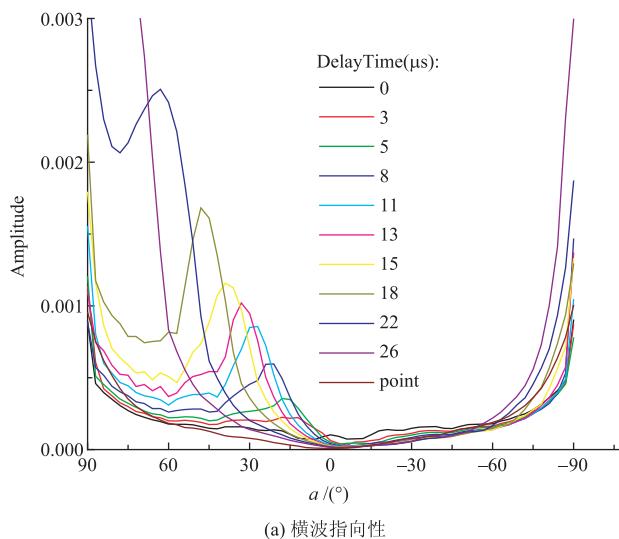
图 2 点声源和相控线阵声源不同延迟时间下在套管井外地层产生的横波波形

Fig. 2 The shear waves excited by point and Linear phased-array sources with various delay times in well cemented condition

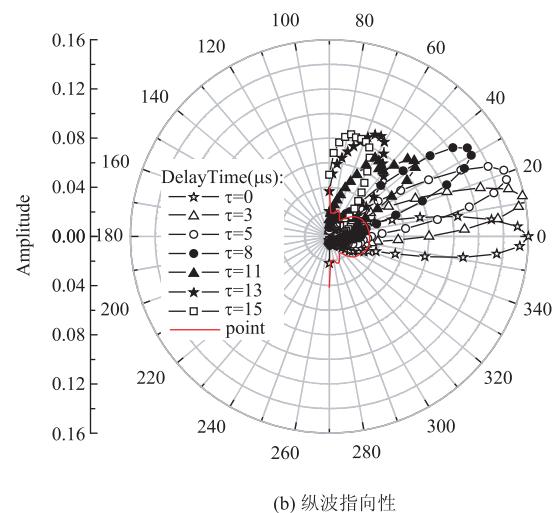
### (2) 纵横波的指向性图

为了定量考察套管井中相控线阵声源在井外地层中激发的纵横波声场的传播特征, 图3表示了在如图1所示的61个位置上纵横波幅度的分布, 也即相控线阵声源阵元间延迟时间 $\tau$ 变化时, 在地层中形成的纵横波声场的指向性图(横波指向性图绘制在直角坐标系中便于区分, 幅度均未做归一化处理)。与单个点声源辐射的指向性图(图中的point)相比, 纵横波在满足同相位叠加位置的幅度

均得到了明显增强; 随着延迟时间的增加辐射纵横波主瓣偏转角均逐渐增大, 主瓣偏转角与延迟时间的关系满足式(11); 对比图3(a),(b)可知, 横波幅度随着主瓣偏转角的增加逐渐变大, 纵波幅度随着主瓣偏转角的增大逐渐减小, 引起这种差别的原因在于不同入射角下纵横波的透射系数不同, 在低角度入射时纵波透射系数大, 随着入射角的增加横波透射系数逐渐增大。这也是在套管井中地层横波信息易于测量的一个原因。



(a) 横波指向性



(b) 纵波指向性

图3 相控线阵不同延迟时间下的横波和纵波的指向性图

Fig. 3 The shear and compressional directivity pattern in the formation with well cemented condition

### 3.2 I界面胶结差 II界面胶结良好

(1) I界面胶结差时点声源和相控线阵声源在井外地层产生的横波声场

图4表示了套管井I界面胶结差(I界面存在5 mm的流体环)时接收的横波波形, 声源的工作方式与图2一致。由图4(a)~(j)可见, 随着阵元间延迟时间的逐渐增加, 辐射横波主瓣偏转角逐渐增大, 与套管井胶结良好时的变化规律一致。图4与图2相比, 不管是点声源(图4(k)中的point)还是相控线阵声源激发, 在幅度较大的地层横波前(时间范围在0.5 ms~1.25 ms)存在从套管耦合到地层的套管波信息, 随着相控线阵相邻阵元间延迟时间的增加从套管耦合到地层的套管波也逐渐增强, 在延迟时间超过13 μs时幅度又逐渐减弱, 这与井孔内相控线阵声源辐射主瓣偏转角较大时, 激发的套管波越来越弱有关。

### (2) 纵横波的指向性图

图5(a) 表示了I界面胶结差时地层横波的

指向性图。与套管井胶结良好时的变化规律基本一致, 这里不在赘述。由图5(b)的纵波指向性图可见, 随着相邻阵元间延迟时间的增加, 辐射主瓣偏转角逐渐增大, 但在主瓣偏转角超过40°时, 由于受耦合到地层的套管波的影响, 主瓣角形状不规则, 说明此范围内精确定向辐射声波的效果变差。对比图4和图5可知, 在纵横波主瓣偏转角方向, 纵波在I界面胶结差时的声波幅度明显低于胶结良好时的幅度, 而横波幅度基本未受影响。

### 3.3 I界面胶结良好 II界面胶结差

II界面胶结差(II界面存在5mm的流体环)时接收的横波波形与I界面胶结差时类似, 在地层横波前均出现了从套管耦合到地层的波形。图6是II界面胶结差时地层中纵横波声场的指向性图, 纵波幅度与胶结良好时相比降低明显。对比图3、图5和图6可知, 在三种胶结状况下, 纵横波辐射主瓣

偏转角均随着相邻阵元间延迟时间的增加而增大,变化规律一致,这也说明在套管井任意胶结状况下,均可实现向套管井外地层定向辐射声波的技术;

且三种胶结状况下,相比于点声源(point),相控线阵声源激发的声场在满足同相位叠加位置的幅度均得到了明显增强。

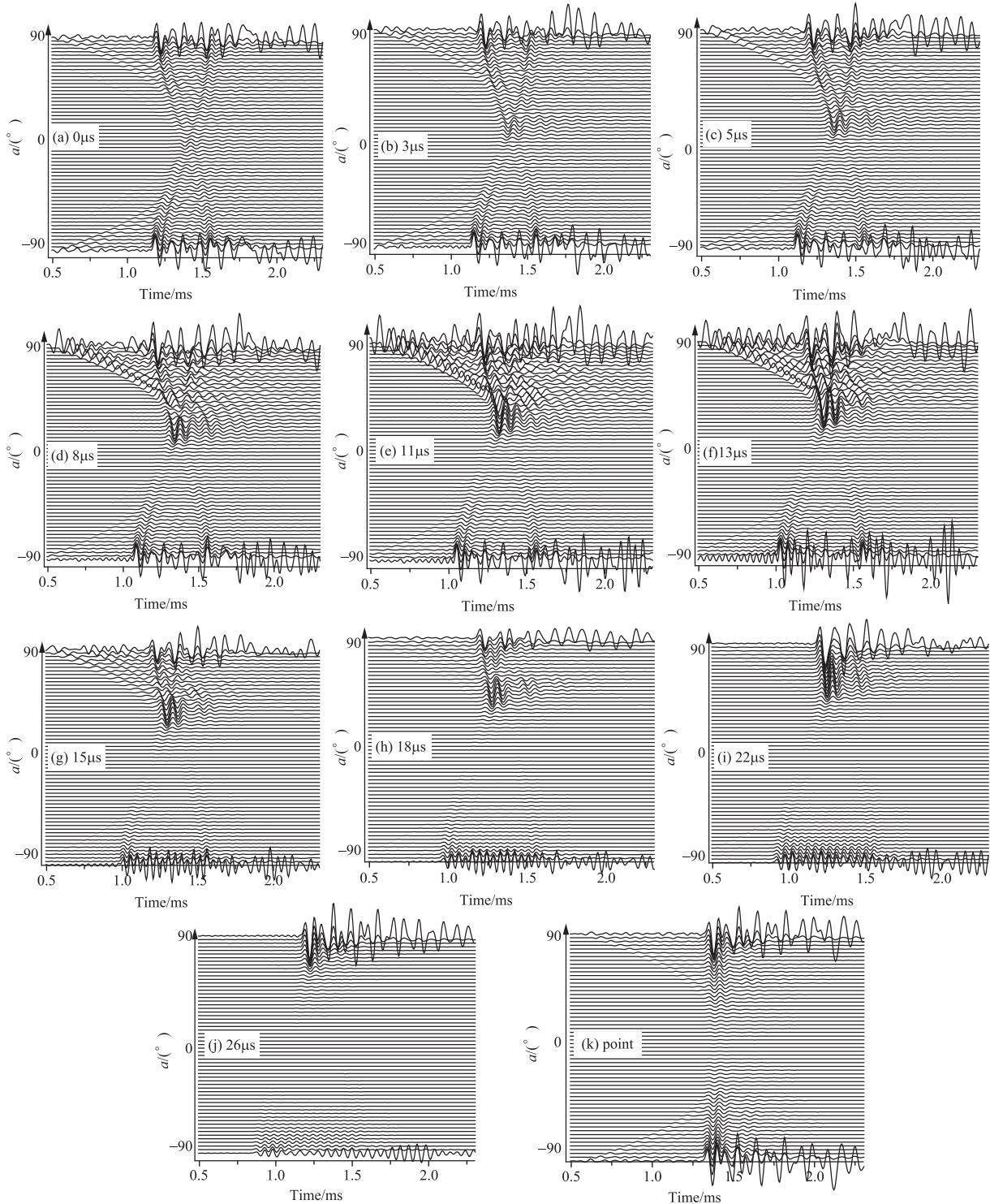


图 4 I 界面胶结差时点声源和相控线阵声源不同延迟时间下在套管井外地层产生的横波波形

Fig. 4 The shear waves excited by point and Linear phased-array sources with various delay times in badly cemented condition for interface I

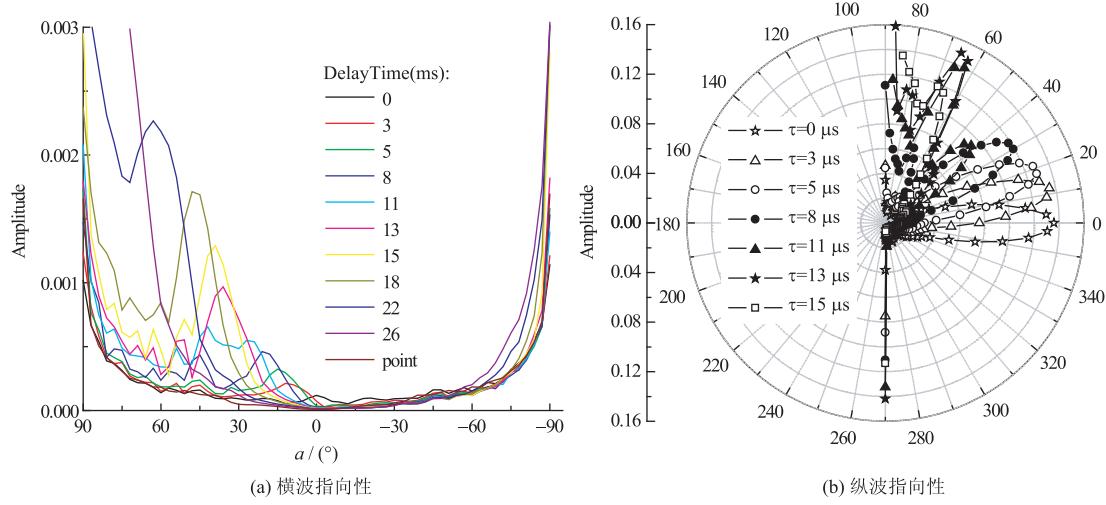


图 5 I 界面胶结差时地层中横波和纵波的指向性图

Fig. 5 The shear and compressional directivity pattern in the formation with badly cemented condition for interface I

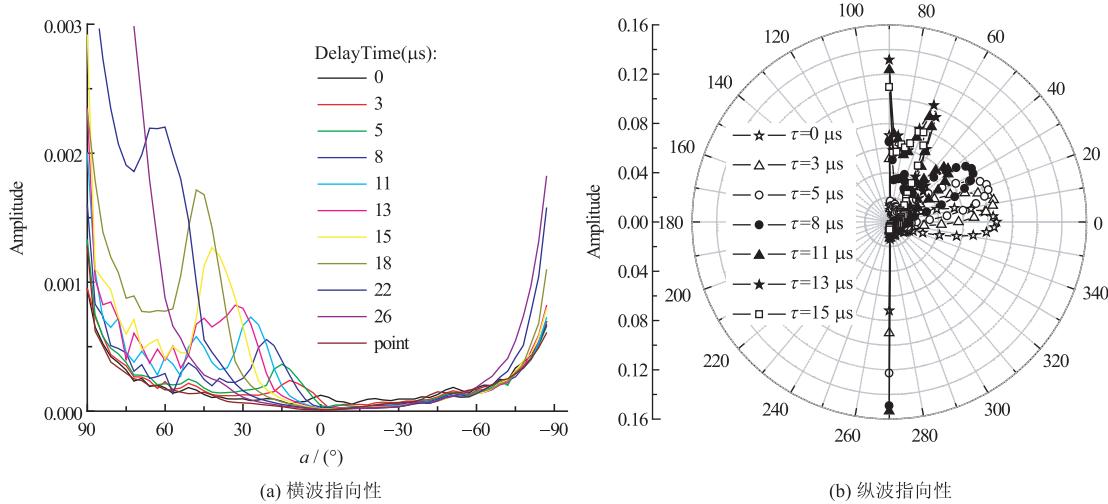


图 6 II 界面胶结差时地层中横波和纵波的指向性图

Fig. 6 The shear and compressional directivity pattern in the formation with badly cemented condition for interface II

### 3.4 考察胶结状况对地层纵横波声场的影响

图 7 对比了声源 3 种典型工作状态下,套管井胶结良好、I 界面胶结差和 II 界面胶结差时地层纵横波的指向特性。由图 7(a)可见套管井的胶结状况对在地层中产生的横波声场影响相对较小,相控线阵声源激发的声场在满足同相位叠加位置声波幅度与点声源(point)相比明显增强。由图 7(b)可知在相控线阵声源辐射主瓣偏转角较小时,在主瓣偏转角方向胶结良好时辐射到地层的纵波幅度最高,I 界面胶结差时次之,II 界面胶结差时辐射到地层中的纵波能量最少;在套管井胶结差时,当辐射主瓣偏转角超过 40° 时,也即主瓣偏转角较大时,由于套管波与地层波的耦合、辐射声束主瓣角宽增大

等原因,使纵波的指向性变差,也即失去了向套管井外地层精确定向辐射声波的技术。

### 3.5 玻璃钢套管对地层中纵横波声场的影响

为了应对油田水质对钢套管的腐蚀,我国油田较多井段已用玻璃钢套管(声学参数见表1)代替了钢套管。图8表示了玻璃钢套管对相控线阵声源在地层中产生的纵横波声场的影响,为了对比两种套管类型对辐射声场的影响,声源的工作状态与图7完全一致。对比图7(b)和图8(b)可见,由于玻璃钢套管的声速较低,在相控线阵辐射主瓣偏转角较大时,由套管耦合到地层的波到时较晚,对直接透射到地层中的纵波基本无影响,使得在相邻阵元间延迟时间等于 $13\ \mu\text{s}$ 时纵波辐射主瓣仍很規

则,这说明套管声阻抗的减小将有利于在套管井外地层实现较大范围的精确定向辐射声波的技术;仔细分析还可发现,在 3 种延迟时间下,纵波幅度(图 8(b))基本保持了胶结良好时大于 I 界面胶结差、I 界面胶结差时大于 II 界面胶结差的变化规律,

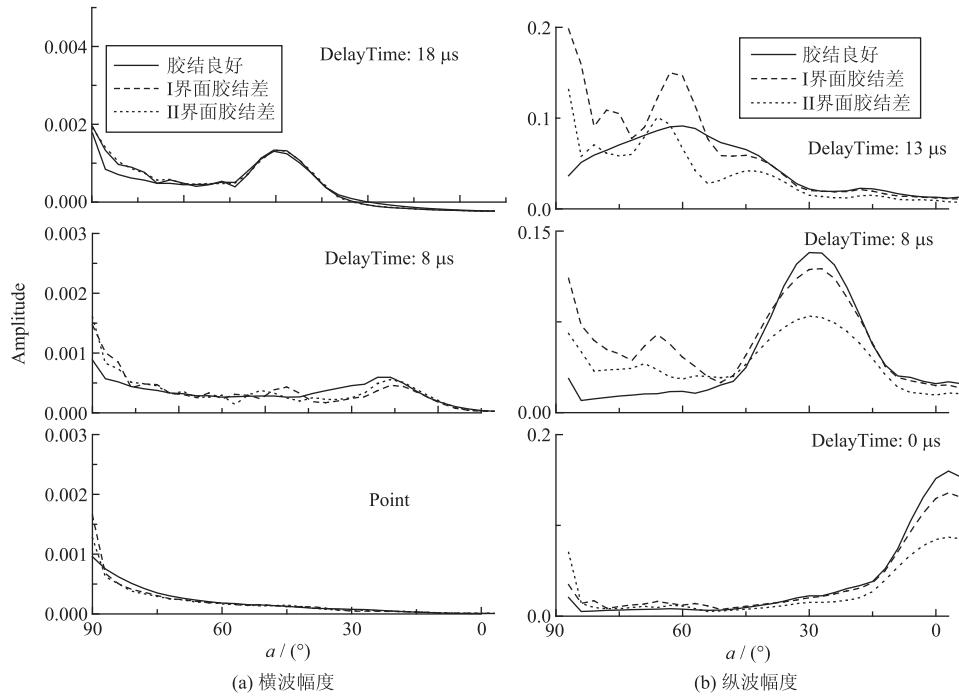


图 7 三种胶结状态下横波和纵波幅度的对比

Fig. 7 Comparison on shear and compressional wave amplitudes among three cemented conditions

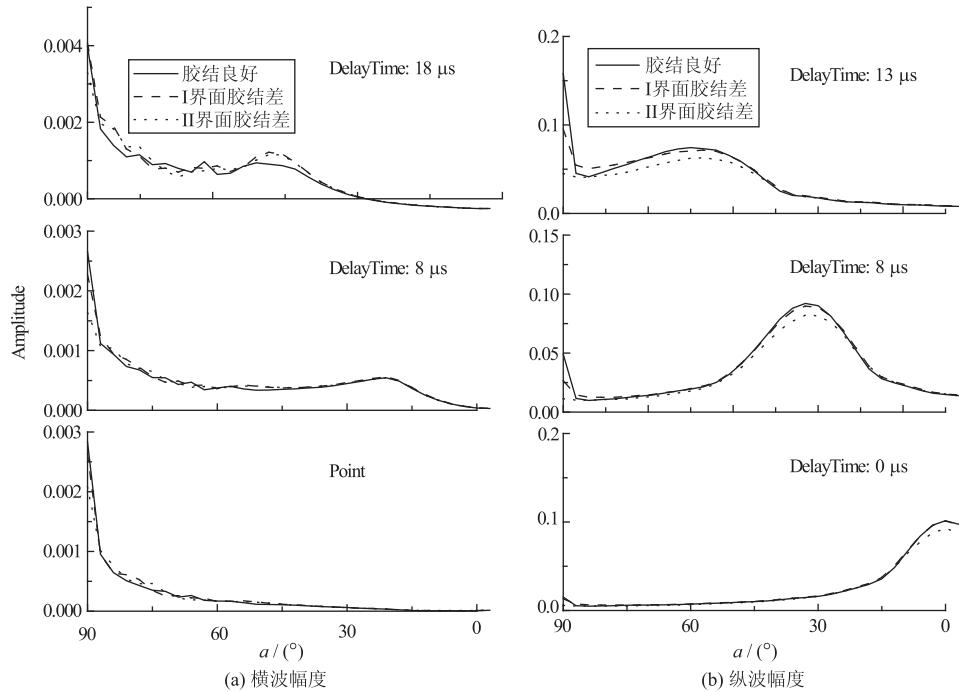


图 8 玻璃钢套管井三种胶结状态下纵横波幅度的对比

Fig. 8 Comparison on shear and compressional wave amplitudes among three cemented conditions with glass casing

只是幅度差异较钢套管时明显降低,这也说明玻璃钢套管使得胶结状况对地层中纵波声场的影响减弱。同样,由于玻璃钢套管声阻抗较低,使横波声场受胶结状况的影响也进一步减弱;在声波辐射方向接近 90°时,也基本消除了套管波耦合的影响。

## 4 结论

本文以现场声波测井探头的工作状态为参考,数值计算了宽带激励下的相控线阵声源在套管井外地层辐射声场的指向性,为相控线阵声源在套管井反射声波测井中的实际应用奠定理论基础。通过对相控线阵声源在套管井外地层激发的纵横波声场的对比,得到了以下结论:

(1) 在主瓣偏转角方向,纵横波幅度的变化规律相反,随着主瓣偏转角的增大,主瓣偏转角方向的横波幅度逐渐增强,纵波幅度逐渐减小;从三种胶结状况下主瓣偏转角方向的纵横波幅度的变化可知,横波声场受套管井胶结状况的影响程度较小,且沿井壁方向传播的横波幅度始终较大,受干扰较小。

(2) 在套管井胶结差时,由于受套管波的干扰,在主瓣偏转角较大时的纵波指向性变差;但用声速较低的玻璃钢套管代替钢套管后,可基本实现在 $0\sim90^\circ$ 范围内定向辐射纵横波的技术;另外,由于玻璃钢套管的声阻抗较低,使得辐射到地层中的纵横波声场受套管井胶结状况的影响程度减弱,这将有利于在套管井胶结差时实现地层真实信息的准确测量。

## 参 考 文 献

- [1] 窦伟坦,侯雨庭. 利用偶极声波测井进行储层压裂效果评价[J]. 中国石油勘探, 2007,(3): 58-63.  
DOU Wutan, HOU Yuting. Evaluation on fracturing effect of reservoirs based on dipole sonic logging [J]. China Petroleum Exploration, 2007(3): 58-63.
- [2] SINHA B, VISSAPRAGADA B, RENLIE L, et al. Radial profiling of the three formation shear moduli and its application to well completions[J]. Geophysics, 2006, 71(6): E65-e77.
- [3] 法林,马鸿飞. 一种声波阵列发射探头的设计[J]. 石油学报,1991,12(3):52-57.  
FA Lin, MA Hongfei. Design of a new type of array transmitting sonic snode[J]. Acta Petrol Ei Sinica, 1991,12(3):52-57.
- [4] 张海澜,萧柏勋. 测井仪器对井孔声场影响的数值研究[J]. 声学学报,2000,25(5):435-439.  
ZHANG Hailan, XIAO Boxun. Numerical study on the influence of the logging tools on the acoustic field of boreholes [J]. Acta Acustic (in Chinese), 2000, 25(5):435-439.
- [5] QIAO W X, CHEN X L, DU G SH, et al. Laboratory simulation on acoustic well-logging with phased array transmitter [ J ]. Chinese Journal of Acoustics, 2003, 22(4): 329-338.
- [6] 车小花,乔文孝. 充液井孔中的相控线阵声波辐射器在地层中产生的声场[J]. 地球物理学报,2004, 47(4): 731-736.  
CHE Xiaohua, QIAO Wenxiao. Acoustic field in formation generated by linear phased array transmitters in fluid-filled boreholes[ J ]. Chinese journal of geophysics, 2004, 47(4): 731-736.
- [7] 陈雪莲,许孝凯. 相控线阵技术在套管井声波测井地层信息测量中的应用[J]. 石油学报, 2008, 29(5):777-781.  
CHEN Xuelian, XU Xiaokai. Application of linear phased-array technique to estimation of acoustic properties of formation in acoustic logging of cased hole[ J ]. Acta Petrol Ei Sinica, 2008 , 29(5):777-781.
- [8] 陈雪莲,吴金平. 向套管井外地层中定向辐射声场的数值计算[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2010, 34(3):43-47.  
CHEN Xuelian, WU Jinping. Numerical simulation on directional radiation technique to the near-borehole formation through casing [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2010, 34(3):43-47.