

套管井弯曲型 Lamb 波衰减测量的数值仿真和试验

陈雪莲^{1,2}, 陶爱华³, 唐晓明^{1,2}, 李盛清^{1,2}, 程林波³, 李疾翎³

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东)深层油气重点实验室, 山东青岛 266580; 3. 中海油田服务股份有限公司油田技术事业部, 北京 101149)

摘要:利用数值仿真和试验测量相结合,分析换能器指向性以及弯曲型 Lamb 波在套管中传播时的扩散特征,给出换能器在距离套管内壁不同位置时测量的衰减值的变化规律。结果表明:随着换能器距离套管内壁越近(仪器直径变大),测量的衰减值越大,但此衰减值的变化与水泥胶结质量无关;在测井仪器偏心时,声系在朝向井周不同方位上测量时其换能器与套管内壁距离也发生改变,且辐射声束传播到套管内壁时入射角也会发生变化,测量的衰减值随方位近似呈现余弦曲线式的变化规律;在声系和套管厚度均保持不变,随着套管外径在一定范围内逐渐增大时,测量的衰减值先稍有增大后又逐渐降低。

关键词:声波测井; 弯曲型兰姆波; 衰减测量; 扩散特征; 指向性声源; 套管井

中图分类号:P 631.5 **文献标志码:**A

引用格式:陈雪莲,陶爱华,唐晓明,等. 套管井弯曲型 Lamb 波衰减测量的数值仿真和试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(3):47-55.

CHEN Xuelian, TAO Aihua, TANG Xiaoming, et al. Numerical simulation and experimental research on flexural Lamb-wave attenuation measurement in a cased well[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020,44(3):47-55.

Numerical simulation and experimental research on flexural Lamb-wave attenuation measurement in a cased well

CHEN Xuelian^{1,2}, TAO Aihua³, TANG Xiaoming^{1,2}, LI Shengqing^{1,2}, CHENG Linbo³, LI Jiling³

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;

2. Key Laboratory of Deep Oil and Gas in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;

3. China Oilfield Services Limited, Oilfield Technology Department, Beijing 101149, China)

Abstract: By analyzing the radiation spreading of Lamb wave and radiation-receiver directivity of the transducers, the trend of flexural Lamb-wave attenuation with instrument diameter increasing is studied. Both numerical simulations and experimental measurements show that the closer the ultrasonic pitch-catch system is to the inner wall of the casing, the greater the measured attenuation value is. The reason is that the flexural Lamb wave radiation spreads as it propagates in the arcuate casing and the covered sound-field sector becomes wider. Therefore, the correction for radiation spreading should be done with the measured attenuation applied to evaluate the cementing quality. When the logging instrument is eccentric, both the distance from the transducer to the inner wall of the casing and the incident angle vary. The measured attenuation values show a trend of cosine-like curve with the tool rotating around casing circumference direction. When the logging tool diameter and casing thickness remain unchanged, the measured attenuation value increases slightly at the beginning and then decreases gradually

收稿日期:2019-08-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41774141,41804124);山东省自然科学基金项目(ZR2019BD039);山东省博士后创新项目(201901011);中国博士后科学基金项目(2019T120615,2018M632745)

作者简介:陈雪莲(1976-),女,副教授,博士,研究方向为声波测井方法及岩石物理。E-mail: chenxl@upc.edu.cn。

通信作者:李盛清(1988-),男,博士,博士后,研究方向为声波测井理论、数据处理和软件研发。E-mail: shidalishengqing@yeah.net。

with gradually increasing casing outer diameter.

Keywords: acoustic logging; flexural Lamb wave; attenuation measurement; radiation spreading characteristics; oriented source; cased wells

斯伦贝谢推出的水泥封隔成像测井(imaging behind the casing, IBC)采用了定向辐射和接收方式^[1-2],在套管中激发弯曲型 Lamb 波(对应平板模型中的反对称 Lamb 波 A0),简称为套管弯曲波。测量声系采用一发两收的方式测量弯曲型 Lamb 波的衰减,发射和接收均是具有辐射指向性的平面换能器(类似活塞声源),发射换能器辐射的声束斜入射(入射角约 33°)到套管内壁的有限区域,在套管中激发弯曲型 Lamb 波,其沿着套管传播时不断的向套管内外介质泄漏声波能量,利用套管内远近两个接收器接收的声波计算其衰减值。实际测井时仪器一边旋转一边匀速上提可得到随深度变化的套管一周的声衰减成像图。国内外很多学者针对此测量方式展开了大量的研究^[1-12],特别是斯伦贝谢的 Froelich 和 Zeroug 等^[1-7]从弯曲型 Lamb 波的激发方式、频散和衰减特征以及现场应用等给出了详细的推导和论述;He 等^[9]数值仿真了套后耦合水泥时弯曲型 Lamb 波泄漏声波能量的现象,Xu 等^[12]研究了利用水泥第二界面的反射波反演水泥声学参数的方法。IBC 测井以及扇区水泥胶结测井(segmented bond tool, SBT)等均是测量将测量的衰减值直接用于固井质量评价^[13],不需要在自由套管刻度,因此可靠准确得到与水泥胶结质量相关的衰减测量结果至关重要。在实际测井时,为了适应不同套管规格的测量,仪器往往配备直径不同的测量声系,声系的直径越大,换能器距离仪器的中心轴越远,也即越靠近套管内壁。声系与套管内壁之间距离的改变对测量的衰减值造成的影响及其变化规律等国内外文献未见有相关报道,但此问题不是单纯的工程问题,其涉及到换能器辐射和接收指向性以及弯曲型 Lamb 波在套管中的传播扩散特征等对在弧形套管中测量衰减的影响。另外,由于 IBC 仪器中的发射换能器定向辐射到套管内壁,人们往往认为被激发的弯曲型 Lamb 波仅在入射声束范围的有限扇区内沿着套管的轴向传播,忽视了波的几何扩散对衰减造成的影响。在水平井或大斜度井中测井时也发现,仪器偏心后即便是自由套管井段,仪器旋转一周扫描测量的衰减值差异明显,偏心会造成换能器辐射面在套管环向不同方位上与套管内壁的距离不同,且在很多方位上换能器辐射声束与套管内壁之间不满足正

入射条件,在此测量环境下的衰减规律变化也值得深入研究。笔者以 IBC 测井仪器的声系结构为参考,利用三维有限差分数值仿真 IBC 仪器这种定向发射和接收技术对套管中测量 Lamb 波衰减的影响,并结合试验测量分析声系与套管内壁距离、套管规格以及仪器偏心时测量衰减值的规律。

1 弯曲型 Lamb 波测井的数值仿真和试验模型

1.1 数值仿真模型

为研究套管井弯曲型 Lamb 波衰减测量的影响因素,采用三维有限差分方法模拟 IBC 测井仪器的响应机制。三维差分程序中振速和应力在空间实施了交错网格差分。IBC 测井仪器采用的是斜入射(井轴方向)方式在套管中激发弯曲型 Lamb 波,发射和接收换能器均为超声平面换能器,实现定向激发和接收方式。数值仿真时加载的声源辐射面类似一个圆盘,直径为 0.03 m,圆盘的法线方向与套管内壁在轴向的夹角等于 57°,其辐射的声波传播到套管内壁时入射角为 33°。圆盘辐射面的背衬采用声速为 350 m/s 吸声材料,发射换能器距离套管内壁的距离可以调节。图 1 为建立的套管井数值仿真模型,纵轴和横轴标注的是网格数,套管内外介质均为水,模型尺寸是 0.29 m × 0.29 m × 0.5 m, x 、 y 和 z 轴上的空间步长为 0.6 mm。为了研究弯曲型 Lamb 波在套管中传播时的扩散特征,在源距分别为 0.125、0.25 和 0.35 m 位置的套管 xoy 截面内设置环向 v_x 振速接收器阵列(图 1(a)中的红色),换能器辐射面正对的方位设为 0°,相邻接收器之间的圆心角是 15°,通过对比 3 个源距上不同方位的振速分量大小,可以观测弯曲型 Lamb 波在套管中传播时的扩散特征。

1.2 试验测量装置

为在实验室研究套管中弯曲型 Lamb 波的扩散特征,建立如图 2 所示的试验测量方案,发射换能器辐射的声束斜入射到套管内壁,入射角等于 33°,在源距 0.1 ~ 0.35 m 的位置分别放置接收器,接收器和发射器距离套管内壁的距离是一致的,倾斜角度关于源距中心线上下是对称的,试验测量时固定发射换能器的位置不变,以套管中心轴线为中心,转动接收换能器,接收不同方位(0 ~ 70°)泄漏的声波幅

度,通过不同方位上泄漏的声波幅度的变化,可以观察弯曲型 Lamb 波在套管中传播时的扩散特征。沿

着探头辐射声束的方向逐渐移动声系,可以观测声系距离套管内壁越来越远时衰减值的变化规律。

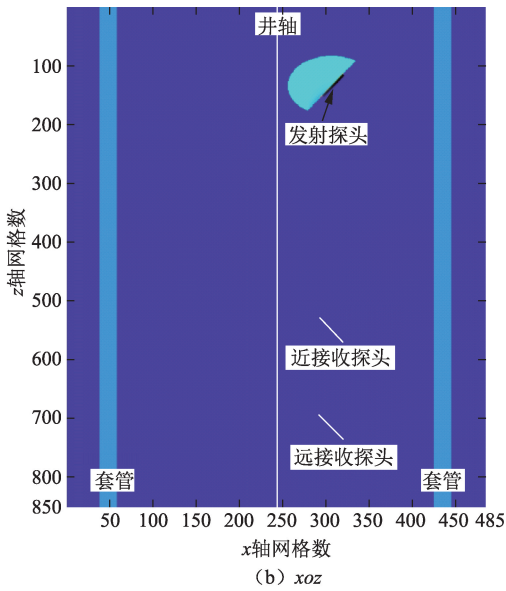
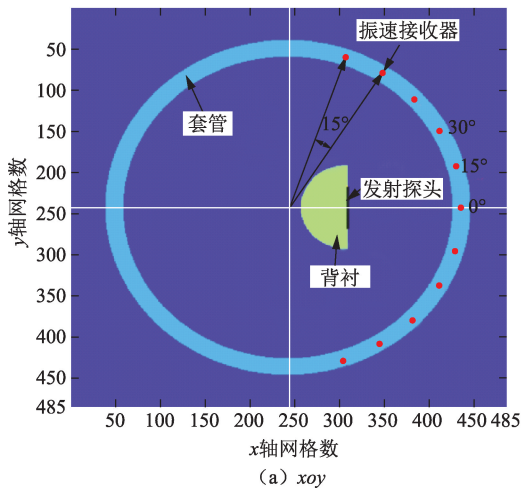


图 1 仿真模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of simulation model

发射换能器,中心频率为 250 kHz,套管外径为 24.4 cm,厚度为 11.99 mm。由图 3 可见,弯曲型 Lamb 波在套管中的 v_x 振速分量对于套管的中心面(内外壁的中心)两侧是同相位的,在频厚积较大(250 kHz×11.99 mm)时振速分量在套管壁上的幅度较大,中心的幅度最低^[14]。随着弯曲型 Lamb 波在套管中传播其能量覆盖范围越来越大,在源距为 0.125 m 时能量主要集中在换能器辐射面正对的扇区,随着源距增加到 0.25 和 0.35 m 时,能量覆盖的扇区向两侧明显扩展。

为了更直观地分析定向声源辐射时沿着套管轴线方向传播的弯曲型 Lamb 波的扩散特征,在源距 0.125、0.25 和 0.35 m 的套管内设置了 x 方向的振速接收器(图 1(a))。图 4 为从换能器正对方位开始间隔 15°共 6 个接收位置的 v_x 振速分量,随着偏离中心位置越来越远,振动的幅度明显降低。3 个接收源距上不同方位的振动幅度对比,可明显见到随着源距越来越大,也即弯曲型 Lamb 波传播越远,偏离中心方位接收器接收的相对幅度增大。把声系直径变小,换能器的辐射面距离套管内壁变远,图 5 为发射换能器距离套管内壁 0.07 m 时不同方位接收的波列图。与图 4 相比,换能器距离套管内壁越远,相同源距下其在套管中的传播距离越短(图 6),弯曲型 Lamb 波所覆盖的环向扇区宽度越窄,其对定向接收计算的衰减值影响变小。对图 4 和图 5 中的波列做希尔伯特变换取弯曲型 Lamb 波波包的峰

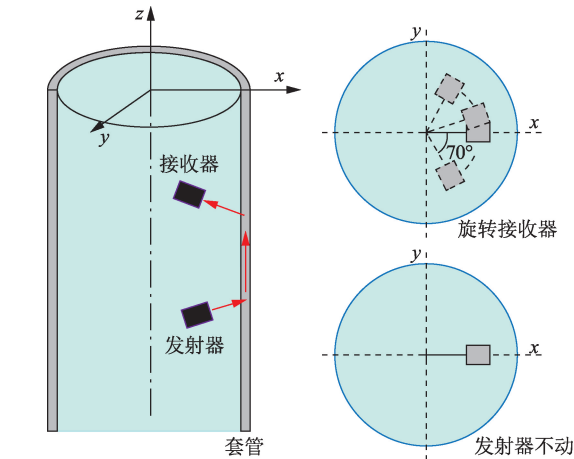


图 2 试验测量声系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experiment model

2 数值仿真和试验测量结果

2.1 弯曲型 Lamb 波在套管中传播的扩散特征

2.1.1 数值仿真结果

套管中弯曲型 Lamb 波是通过有限声束的定向辐射产生的,在测量衰减时接收换能器也是定向接收的,因此其在套管中的传播扩散会影响测量的衰减值。图 3 为数值仿真套管中弯曲型 Lamb 波传播时 xoy 截面上 x 方向振速(v_x)的声场快照,源距分别为 0.125 m(65 μ s)、0.25 m(105 μ s)和 0.35 m(135 μ s)。发射换能器辐射面中心与套管内壁之间的距离设置为 0.04 m,取余弦包络脉冲函数加载到

值,将每个源距下的 11 个(图 1(a)所示的接收器)峰值做归一化显示,如图 7 所示。可明显地发现,随着源距的增大弯曲型 Lamb 波能量覆盖了更宽的扇

区范围;随着换能器距离套管内壁越远,同一源距下的弯曲型 Lamb 波的能量覆盖到的环向扇区面积越小。

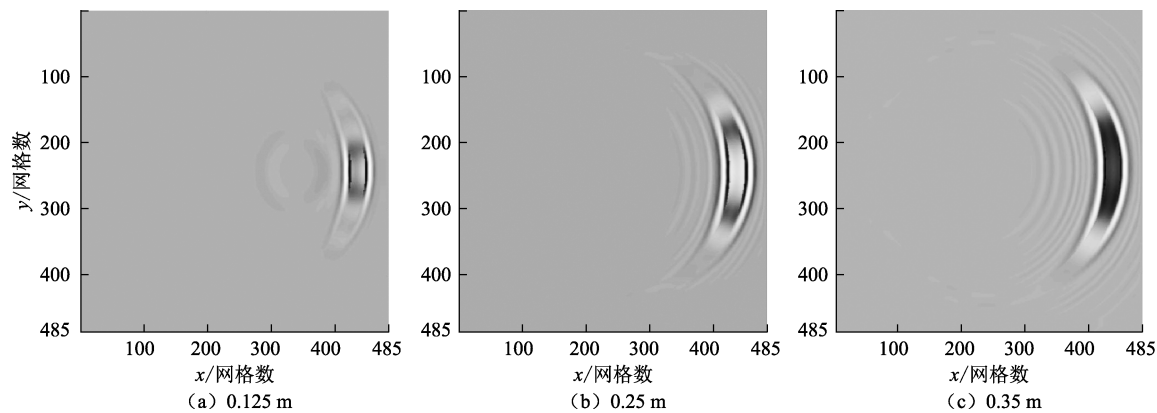


图 3 不同源距位置 xoy 截面上 v_x 振速的声场快照
Fig. 3 Snapshots of v_x at xoy cross section with different offsets

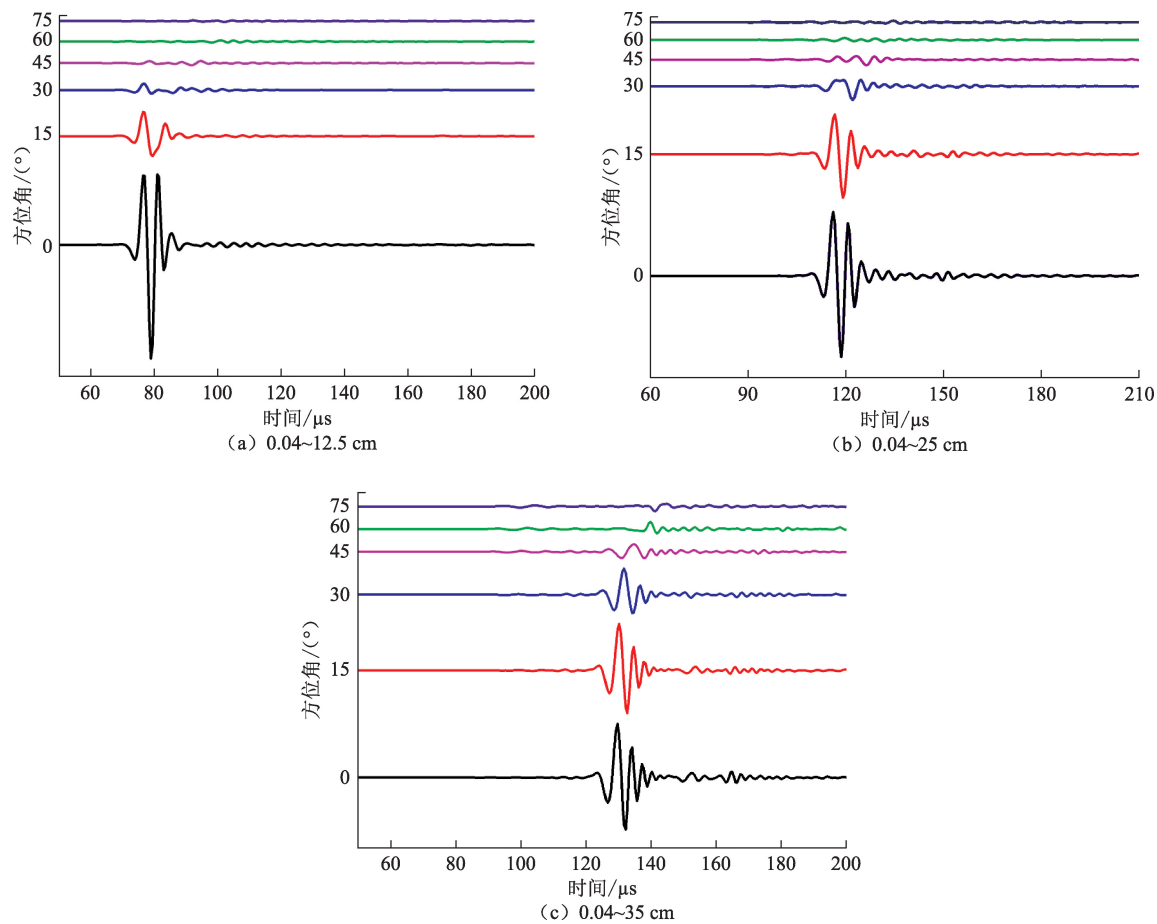


图 4 发射换能器距离套管内壁 0.04 m 时 3 个源距下接收的方位阵列波形
Fig. 4 Azimuthal array waveforms received at three offsets with 0.04 m distance from transducer to inner casing wall

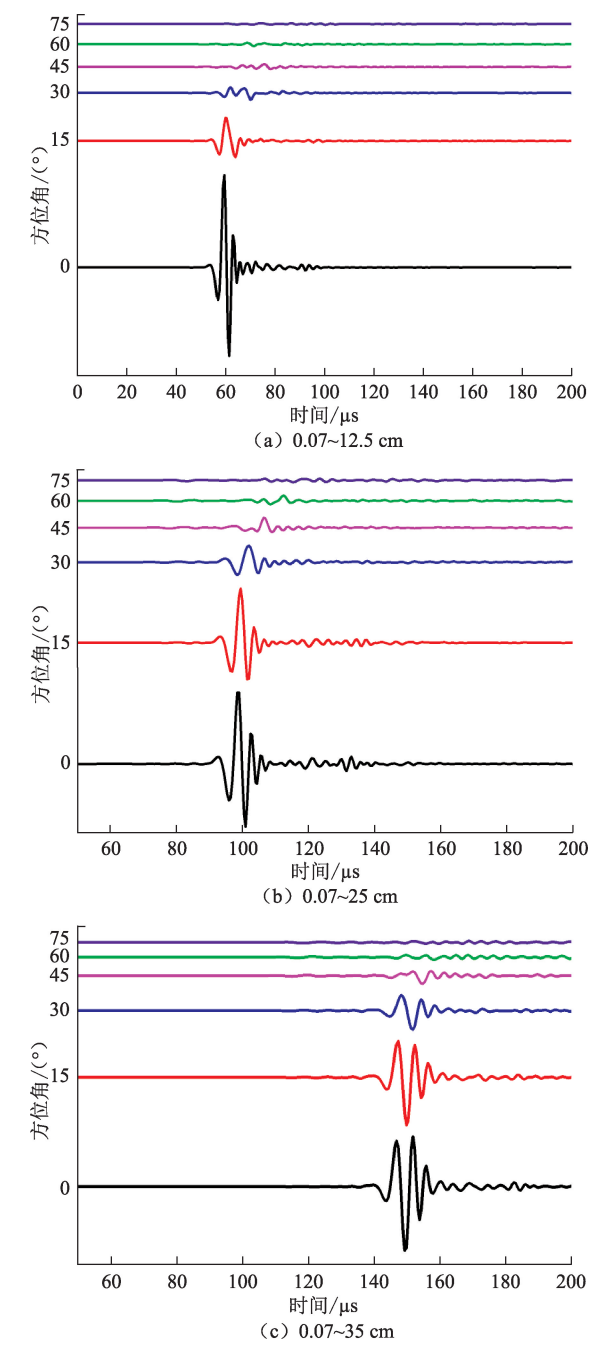


图 5 发射换能器距离套管内壁 0.07 m 时 3 个源距下接收的方位阵列波形

Fig.5 Azimuthal array waveforms received at three offsets with 0.07 m distance from transducer to inner casing wall

2. 1. 2 试验测量结果

图 8 显示了试验测量源距分别为 0.25 和 0.35 m 时不同方位上接收的波列图,在较远的 0.35 m 源

距的接收阵列上,中心方位和最远方位的幅度差异变小,也即弯曲型 Lamb 波的扩散使得其能量在套管扇区上的覆盖范围变大。图 9 是对源距分别为 0.10、0.15、0.20、0.25、0.30 和 0.35 m 处接收到的泄漏 Lamb 波幅度及其归一化幅度随着方位的变化曲线。随着源距变长,不同方位上的能量分布差异越来越小。试验测量结果和仿真结果均显示了定向辐射激发的弯曲型 Lamb 波在套管中传播时的扩散现象。

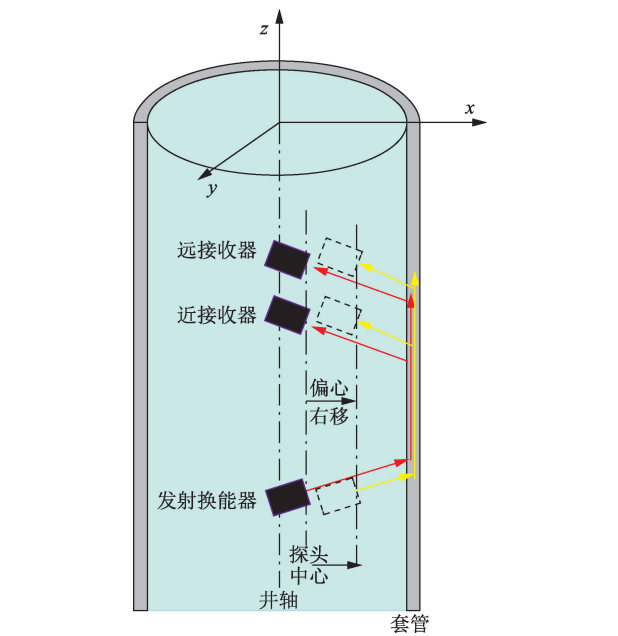


图 6 弯曲型 Lamb 波传播路径示意图

Fig.6 Schematic diagram of flexural Lamb-wave propagation path

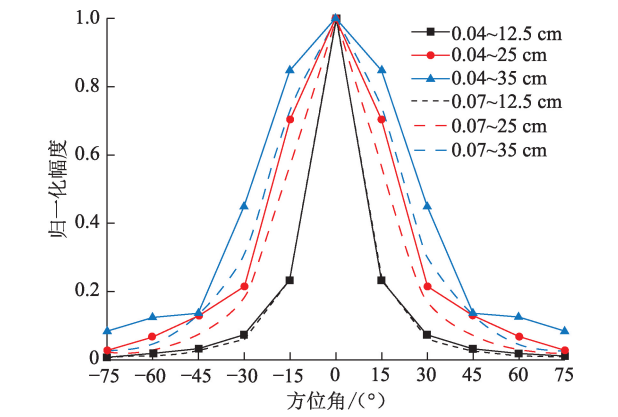


图 7 不同方位下幅度的归一化对比

Fig.7 Comparison of normalized amplitudes at different azimuthal angles

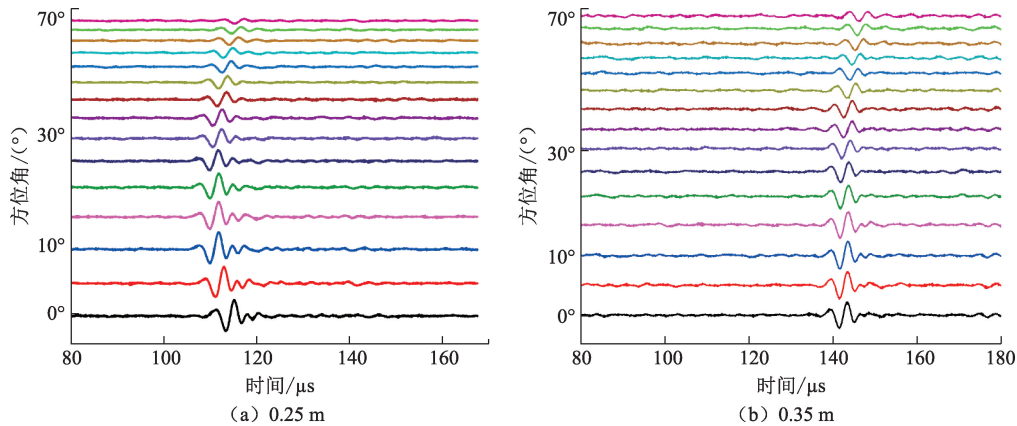


图8 源距为0.25和0.35 m时接收的波列图

Fig. 8 Received wave train at 0.25 m and 0.35 m offsets

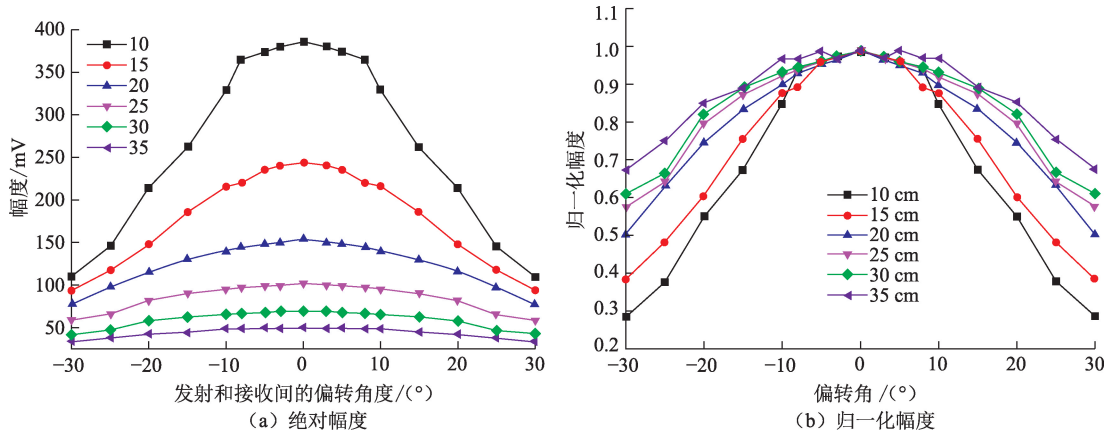


图9 不同方位下测量的绝对幅度和归一化幅度

Fig. 9 Absolute and normalized amplitudes measured at different azimuthal angles

2.2 弯曲型 Lamb 波的扩散和定向接收技术对衰减测量的影响

2.2.1 换能器的指向性测量

综上,弯曲型 Lamb 波在套管中传播时不同源距下其能量覆盖的环向扇区范围不同,套管内的换能器的接收指向性将直接影响弯曲型 Lamb 波的衰减测量结果。为此,试验测量了换能器的指向性。在尺度为 110 mm×80 mm×50 mm 的水池中,对换能器进行了指向性测量。HP33120A 信号源产生一个周期的 Burst 信号加载到换能器,输出幅度的峰峰值是 10 V,频率 ω 为 250 kHz。测量时,发射换能器不动,利用 B & K8103 水听器绕其圆心旋转等角度移动,如图 10 所示。根据换能器辐射面的半径和使用的工作频率,计算得到的近远场的临界距离是 0.0375 m (半径的平方与波长之比),在测量换能器的指向性时发射和接收换能器之间的距离远远大于 0.0375 m。图 11 所示为发射和接收换能器之间的距离分别为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 m 时测量的归一化幅度随着方位角变化的指向性,并与式 (1) 给出的

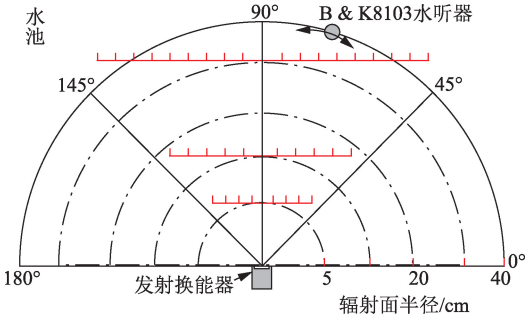


图10 换能器指向性试验测量示意图

Fig. 10 Schematic diagram of experimental measurement of transducer directivity

解析指向特性^[15]做了对比。试验测量和理论计算的远场指向性图吻合很好,显示了换能器较好的辐射指向性,根据互易原理,此换能器作为接收器时其接收指向性与图 11 显示的指向性是一致的。

$$D(\theta) = \left| \frac{2J_1(k_t a \sin \theta)}{k_t a \sin \theta} \right| \quad (1)$$

其中

$$k_t = \omega / V_t$$

式中, a 为发射换能器半径; θ 为方位角; J_1 为贝塞尔函数; V_f 为换能器所在介质的声速。

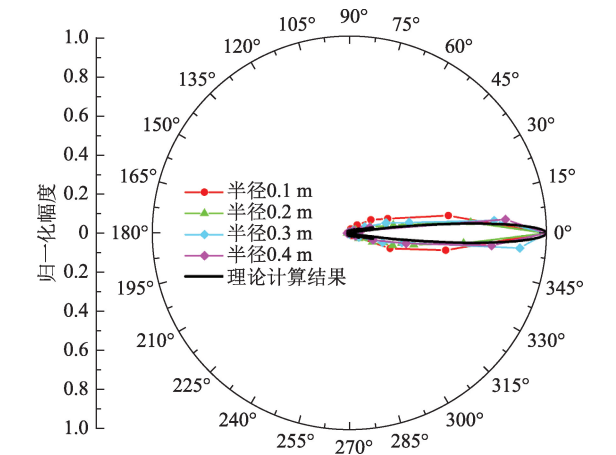


图 11 换能器的辐射指向性

Fig. 11 Radiation directivity of transducer

2.2.2 声系与套管内壁距离的变化对测量衰减值的影响

数值仿真和试验测量均表明定向辐射声源在套管中激发的弯曲型 Lamb 波在套管中沿着轴向传播时所覆盖的扇区面积越来越大,由于接收换能器具有明显的空间指向性,对从套管辐射到井内流体的声波具有一定的环向覆盖面,接收换能器只接收到可传播到其辐射面的泄漏声波能量。弧形套管中泄漏到井内流体的声波具有扇区汇聚的传播特征,在换能器距离套管内壁较近时,其能接收到的扇区面积变小;另一方面,相同仪器源距下,换能器距离套管内壁越近,弯曲型 Lamb 波在套管中传播的距离越长(图 6),其扩散越明显,而远换能器能覆盖的扇区与近换能器是一致的,因此远换能器所对应的扇区内弯曲型 Lamb 波的能量占总能量的比例降低,使得远换能器比不扩散时接收的幅度低,因此按照

$$\alpha = -\frac{20}{L_{RR}} \lg \left(\frac{A_{far}}{A_{near}} \right) \quad (2)$$

计算的衰减率会偏大,导致声系距离套管内壁越近测量的衰减值越大,但此增加的衰减值与水泥的胶结质量无关。式中, L_{RR} 为接收器间距, m; A_{near} 和 A_{far} 表示近、远接收器接收到的泄漏声波的幅度(取希尔伯特变换后的幅值)。

图 12 为试验测量和数值仿真得到的外径 24.4 cm 套管中测量的衰减与换能器和套管内壁距离之间的关系,数值仿真和试验测量结果均显示了距离套管内壁越近测量的衰减值越大。对于 17.78 cm 外径的套管,随着声系与套管内壁距离的增加衰减减小的速度更快,也即套管曲率越大衰减变化的越

明显。改变套管外耦合介质,图 12 显示了外径 24.4 cm 套管外介质由水变为空气时衰减随着声系与套管内壁距离减小时的变化趋势,其变化斜率与套管外是水时是一致的,只是整体下移了 0.26 dB/cm,此衰减变化量正是套管外介质造成的衰减。

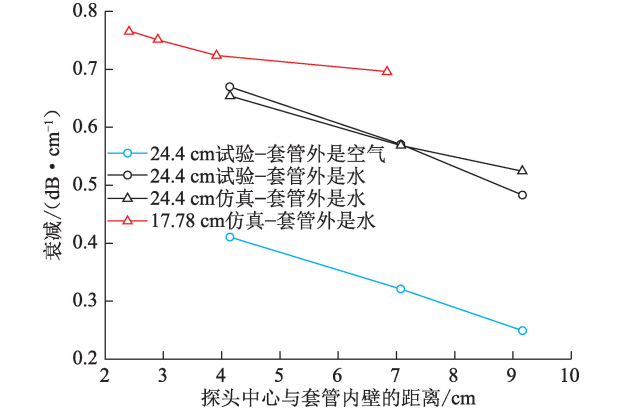


图 12 换能器和套管内壁距离对弯曲型 Lamb 波衰减的影响

Fig. 12 Influence of distance between transducer and casing inner wall on measured attenuation of flexural Lamb wave

图 13 为固定套管厚度 8.94 mm,根据仿真波形得到的弯曲型 Lamb 波衰减随套管外径增加时的变

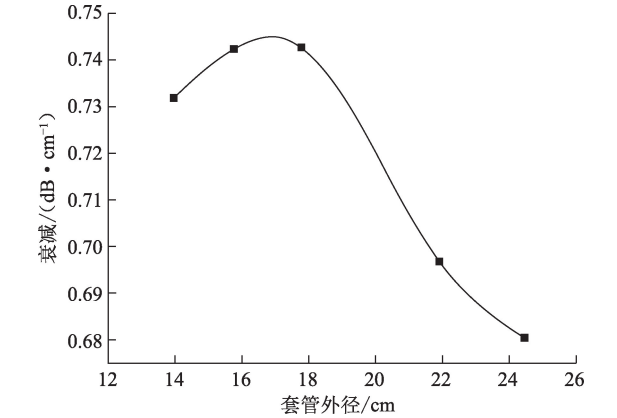


图 13 套管外径增大时衰减的变化规律

Fig. 13 Variation trend of attenuation with casing diameter increasing

化规律。在套管外径从 13.97 cm 开始增加时,先稍有增加后逐渐减小,此变化趋势体现了测量的弯曲型 Lamb 波衰减受其在套管中扩散、套管曲率以及换能器指向性等因素综合作用的结果。在套管外径开始增加时,套管曲率的降低会导致远换能器所对应的扇区内弯曲型 Lamb 波的能量占总能量的比例降低,因此衰减会稍有增大;随着套管外径再逐渐增大,换能器距离套管内壁的距离增大,测量的衰减值又逐渐减小。

2.2.3 仪器偏心对衰减值测量的影响

图14显示了仪器偏心距分别为0.01 m和0.02 m时仪器旋转一周测量的衰减值。在仪器偏心0.01 m时,在 0° 方位时衰减值偏大而 180° 时偏小;随着偏心距的增加到0.02 m,井周一圈的衰减波动范围变化更大,尤其在 0° 和 180° 方位处,测量值的差异更明显。 0° 位置是探头辐射面正对套管内壁且距离最近, 180° 是探头辐射面正对套管内壁但距离最远。从仪器旋转一周记录的波形(图15(a))可见,在 180° 声波幅度最大,主要原因是探头正对套管内壁且探头距离内壁最近,而Lamb波在套管中传播的距离最短,整个传播路径上造成的衰减最小(弯曲线型Lamb波的衰减主要是由于在套管中向两侧介质泄漏能量造成的);在 90° 时波形幅度最小,这是由于探头辐射面在水平面内斜入射到套管内壁,从套管泄漏出来的声波辐射方向偏离换能器所在的方位

(图15(b)),接收到的波形能量损失最大造成的。

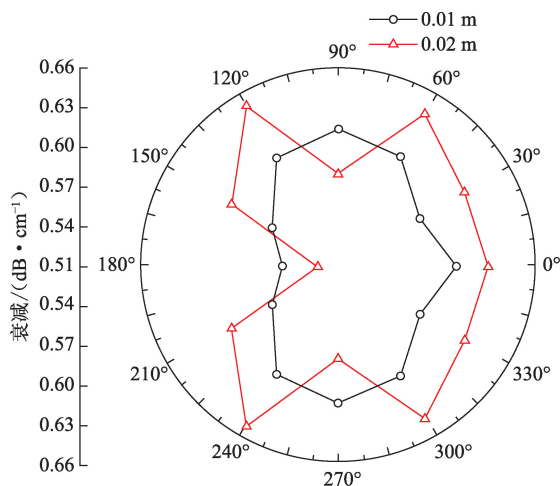
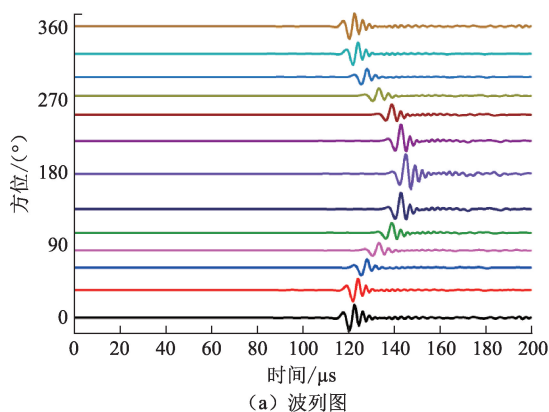
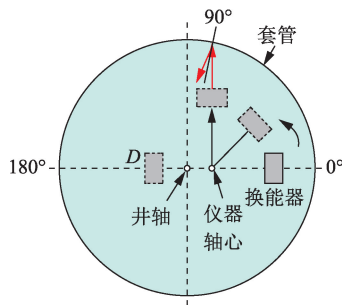


图14 仪器偏心旋转一周测量的衰减值

Fig. 14 Attenuation versus azimuthal angles with different off-centered percent



(a) 波列图



(b) 偏心示意图

图15 声系偏心0.01 m时不同方位接收的波列图

Fig. 15 Received waveforms versus azimuthal angles with a 0.01 m off-centered tool

3 结论

(1) 试验测量和数值仿真均显示了定向声源激发的弯曲线型Lamb波在套管中的扩散现象,随着测量声系距离套管内壁越近,测量的衰减值越大。这种扩散和接收指向性引起的衰减与水泥的胶结状况无关,需要校正。

(2) 仪器偏心在大斜度井或水平井中经常发生,随着仪器偏心距的增大,仪器扫描一周测量的衰减值差异变大,尤其是在 90° 和 270° 时,由于换能器辐射的声波不再是垂直入射(环向观测)到套管内壁,接收到的波形信噪比很低,此方位测量的衰减率不再可靠。

(3) 数值仿真和试验测量时换能器的辐射面是0.03 m的圆盘形状,若换能器辐射面的大小和形状

发生改变,其在不同规格套管中测量的衰减与本文模拟结果也会有差异,这也体现了定向发射和接收技术应用在弧形套管中测量弯曲线型Lamb波衰减受到多种因素的影响,各种因素综合作用下测量的衰减值在实际应用于固井质量评价时需要针对不同的仪器直径和套管规格做解释图版。

参考文献:

- [1] SYLVAIN T, CHRISTOPH K, MIKHAIL L, et al. Ultrasonic cement logging: expanding the operating envelope and efficiency: SPWLA 58th Annual Logging Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, USA, June 17-21, 2017 [C]. Houston: SPWLA, c2017.
- [2] KUIJK R, ZEROUG S, FROELICH B, et al. A novel ultrasonic cased-hole imager for enhanced cement evaluation: International Petroleum Technology Conference,

- Doha, Qatar, November 21-23, 2005 [C]. Richardson: IPTC, c2005.
- [3] ZEROUG S. Method and apparatus for ultrasonic imaging of a cased well; US 6483777 [P]. 2002-11-19.
- [4] ZEROUG S, FROELICH B. Ultrasonic leaky-Lamb wave imaging through a highly contrasting layer; IEEE symposium on ultrasonics, Honolulu, HI, USA, 5-8 October, 2003 [C]. Honolulu: IEEE, c2003.
- [5] ZEROUG S. Forward modelling for ultrasonic leaky Lamb-wave based imaging through a highly contrasting steel cylindrical layer; IEEE ultrasonic symposium-proceedings, Montreal, Quebec, Canada, 23-27 August, 2004 [C]. Montreal: IEEE, c2004.
- [6] FROELICH B. Multimode evaluation of cement behind steel pipe [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 123(5): 3648-3652.
- [7] LEMARENKO M, KLIEBER C, THIERRY S, et al. Resonance based inversion of acoustic impedance of annulus behind casing; US 10345465 [P]. 2019-07-09.
- [8] 丁燕. 固井水泥环声阻抗周向分布的超声波评价方法研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2011.
DING Yan. The research of appraisal for the circumferential distribution of cementing acoustic impedance using ultrasonic [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2011.
- [9] HE X, CHEN H, WANG X M. Ultrasonic leaky flexural waves in multilayered media: cement bond detection for cased wellbores [J]. Geophysics, 2014, 79(2): A7-A11.
- [10] MA Q, HU W X. Methods for analyzing and solving dispersion characteristics of leaky modes of layered half-space with fluid loading; The 21st international congress on sound and vibration, Beijing, China, 13-17 July, 2014 [C]. Beijing: ICSV, c2014.
- [11] 陈雪莲, 李建赛, 唐晓明, 等. 套管中泄漏弯曲型 Lamb 波的传播特征 [J]. 声学学报, 2016, 41(3): 296-304.
CHEN Xuelian, LI Jiansai, TANG Xiaoming, et al. The propagation characteristics of leaky flexural-Lamb waves in casing [J]. Acta Acoustica, 2016, 41(3): 296-304.
- [12] XU F L, HU H S. Inversion of the shear velocity of the cement in cased borehole through ultrasonic flexural waves [J]. Geophysics, 2017, 82(2): D57-D68.
- [13] BIGELOW E L, DOMANGUE E J, LESTER R A. A new and innovative technology for cement evaluation [R]. SPE 20585, 1990.
- [14] 罗斯 J R. 固体中的超声波 [M]. 何存福, 译. 北京: 科学出版社, 2004: 88-98.
- [15] TANG X M, ZHU Z Y, TOKSÖZ M N. Radiation patterns of compressional and shear transducers at the surface of an elastic half-space [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1994, 95(1): 71-76.
- (编辑 修荣荣)