

◇ 研究报告 ◇

分扇区水泥胶结测井胶结质量的定量评价研究*

李佩笑[†] 林伟军 张秀梅

(中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

摘要 为了实现分扇区水泥胶结测井仪 (SBT) 对第二界面 (水泥-地层界面) 的检测, 本文在 SBT 的声系结构基础上, 通过优化声源入射角提出检测水泥胶结质量的新方法。本文首先分析了不同充液条件下薄壁管激发的模态波频散特征; 之后应用三维有限差分算法模拟薄壁管 and 实际套管井在斜入射声源激励下的声场, 由计算结果提出激励速度“平台”上的模态有利于检测界面胶结质量; 最后通过一系列波场模拟与分析来论证应用接收信号定量评价一二界面胶结质量的可行性。结果表明, 特定的入射角可激励出对应速度“平台”处的模态, 该模态波的特征较好的体现在接收信号中, 可利用其幅度衰减程度判断水泥的胶结质量。该成果为套管井二界面水泥胶结质量的定量检测提供了研究基础。

关键词 套管井, 三维有限差分, 二界面检测, 分扇区水泥胶结测井仪

中图分类号: O426.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2016)01-0027-09

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2016.01.005

Research on quantitative evaluation of cementing quality using the segmented bond logging technique

LI Peixiao LIN Weijun ZHANG Xiumei

(State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Based on the segment bond tool (SBT) structure, a new method using obliquely incident ultrasonic wave is explored to improve the quantitative evaluation of cementing quality on the second interface. Firstly, the dispersion relations of pipes under different conditions are analyzed. Then, finite difference algorithm is applied to simulate the acoustic fields of the pipe and cased well which both motivated by obliquely incidence wave, the simulation results suggest the modes on the 'plateau' help evaluation. The acoustic fields of the cased wells with different cementing qualities are simulated and the received waves are used to demonstrate the feasibility of cementing evaluation. Results show the modes on the 'plateau' can be motivated by obliquely incidence wave and the modes' amplitude attenuation can be used to evaluate the cementing quality. This method provides the basis for quantitative evaluation of cementing quality on the second interface.

Key words Cased well, 3D finite difference, Second interface, Segment bond tool

2015-04-27 收稿; 2015-07-04 定稿

*国家重点基础研究发展计划资助项目 (2011CB707901), 国家自然科学基金重点基金资助项目 (11134011) 及面上项目 (41274134) 共同资助

作者简介: 李佩笑 (1989-), 女, 浙江人, 博士研究生, 研究方向: 井孔声场。

[†] 通讯作者 E-mail: lipeixiao10@mails.ucas.ac.cn

1 引言

声波测井是固井质量检测的有效方法之一。固井是指在套管和外地层间筑水泥来分隔油、气、水层,保护油井的生产。由于实际生产施工的复杂性,套管-水泥界面(第一界面)和水泥-地层界面(第二界面)常常不能完全胶合,出现层间流体窜通,工程上一般将层间流体窜通称为窜槽。窜槽严重影响油井的生产,需要定期检查以保障固井质量。在实际生产中,声波测井仪器是检测水泥胶结质量的重要手段,其中的分扇区水泥胶结测井仪(Segment bond tool, SBT)因有较高的纵向和环向分辨率而被广泛的应用于套管井固井质量检测^[1]。SBT包括衰减率测量和VDL两部分,其中衰减率测量部分利用6个推靠到套管内壁上的极板,将管外环空分成六个扇区,分别测量各个扇区的衰减率,从而得到第一界面环向上的水泥胶结情况。SBT较常用的水泥胶结测井仪CBL(Cement bonding logging)/VDL(Variable-density logging)在环向检测上很大的优势,但是它第二界面并不敏感,很少用于第二界面胶结质量检测。为了发挥SBT在环向探测上的优势,拓展其在第二界面检测中的应用,有必要在SBT声系结构的基础上,通过改变部分声系结构,探索应用接收信号评价第二界面胶结质量的方法,并以此加深声波在套管井中传播规律的认识。

SBT仪器衰减率测量部分的发射和接收换能器都是贴井壁的,为了研究贴井壁声源激发的声场,沈建国^[2]等使用实轴积分法研究了大偏心声源声场在井壁附近的传播规律,张海澜^[3]等进一步讨论了大偏心声源井孔声场的分析方法,但他们主要考虑的是裸眼井声场,未考虑套管井声场;张秀梅^[4]、何峰江^[5]等分别模拟了贴井壁声源激发的声场,但未考虑套管井柱状多层结构和水泥局部缺失的实际复杂性,宋若龙^[6]等研究了8扇区的扇区水泥胶结测井仪器在环向任意方位存在水泥缺失时的测井波形,但其未区分是第一还是第二界面的水泥缺失。

另一方面,近几十年以来,国内外学者对超声在圆管上的传播进行了较为全面而深入的研究。沿管道轴向传播的超声导波有三个主要模式:纵向轴对称模式 $L(0,m)$,扭转模式 $T(0,m)$ 和弯曲模式 $F(n,m)$ ^[7],其中 n 和 m 分别表示模式的周向阶次和

模数。Gazis^[8]求得了在无限长空心圆柱体中传播通解, Silk和Bainton^[9]研究了用 $L(0,1)$ 模式导波对管道进行检测的情况, Brook^[10]等也研究了利用 $L(0,2)$ 模式导波检测管道的方法,国内何存富等^[11]人研究了在管道中超声导波的激发和接收,并研究应用超声导波实现管道、长骨等的无损检测的效果。

本文将分析套管井简化模型的模态波特征,并结合数值模拟结果,研究应用斜入射超声波来激发特定导波模式,并根据接收波形来实现对第一、二界面水泥胶结质量评价。

2 理论研究模型及方法

2.1 物理模型

图1是套管井的物理模型,从内到外依次为声波测井仪、井内流体、套管、水泥环和半无限大地层。SBT衰减率测量部分的结构如图2所示,其发射接收声系由推靠臂支撑的六个滑板组成^[12],每个滑板上有一个发射换能器(T)和1个接收换能器(R),相距0.38 m (15 in),滑板编号为奇数的比偶数的高出半个滑板长度(0.19 m)。套管及管外环空被接收换能器分成六个扇区,其中R2、R3之间为第一扇区,R3、R4之间为第二扇区,以此类推。当检测第一扇区水泥胶结质量时,由T1、T4分别发射,R2、R3接收,共同组成了螺旋状的双发双收补偿式衰减率测量系统。套管井中的套管、水泥、地层和窜槽的相互位置关系如图3所示,图3中灰色部分表示流体窜槽,其中套管-水泥间流体为第一界面窜槽,水泥-地层间流体为二界面窜槽。窜槽的起始位置为R1所在的位置,窜槽的大小即为窜槽的环向角度大小。

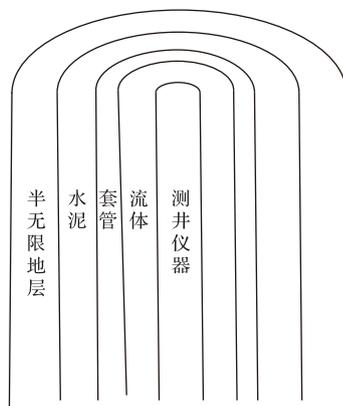


图1 物理模型

Fig. 1 Physical model

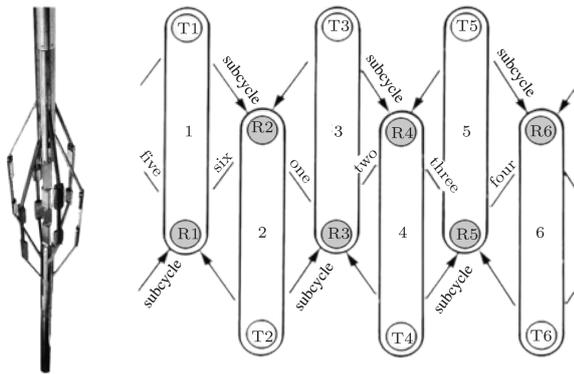


图2 SBT测井仪滑板整体和展开图

Fig. 2 SBT configuration and expanded view

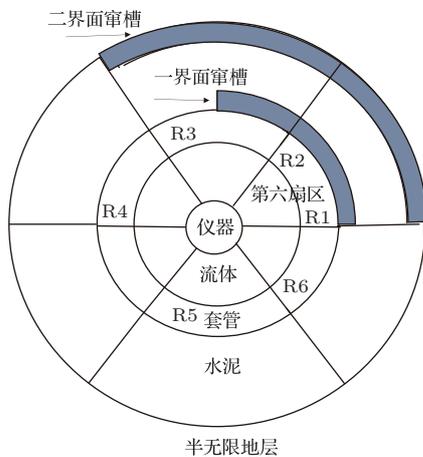


图3 套管井俯视图

Fig. 3 Top view of the cased well

对于图1所示的模型,当分析它的导波模式时,前人如 Zeroug^[13]、He^[14]等,常将其简化为内外充液套管模型,且由于声源频率较高,波长相对套管的曲率半径而言很小,常将套管简化为二维钢板进行分析。但考虑到SBT的声源主频是100 kHz,套管内部流体中传播波的波长约为0.015 m,对一个外半径0.076 m的套管而言,波长相对套管的曲率半径约为0.2,不是很小,所以本文不做进一步的简化,仍使用内外充液钢管模型。考虑到充液钢管的物理特点:钢管的横波速度大于内外液体声速;钢管外部为同一液体,液体内无声阻抗差。为了使套管井模型的物理参数特征尽量和简化模型相一致,对本文中适用简化模型的套管井作如下规定:水泥和地层的横波速度值小于钢管的横波速度值;套管井中水泥和地层间的声阻抗值差值相较于水泥-套管的声阻抗差值较小。

由于充液钢管的模式分析较为复杂,本文将从

真空钢管开始,递进分析内部充液外部真空的钢管和内外都充液的钢管中纵向轴对称模式的频散特征。首先分析真空钢管中模式波的相速度频散特性。根据边界条件求解波动方程,结合全局矩阵法,解得频散方程^[7]:

$$|C_{ij}| = 0, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6, \quad (1)$$

其表达式参见文献^[7]。方程代入以下参数:钢管壁厚10 mm,外径0.1524 m,纵波速度6000 m/s,横波速度3200 m/s,密度7800 kg/m³,计算真空钢管在声源频率100 kHz附近的轴对称纵向模式包括L(0,1), L(0,2)相速度频散曲线,结果如图4中红色曲线所示。

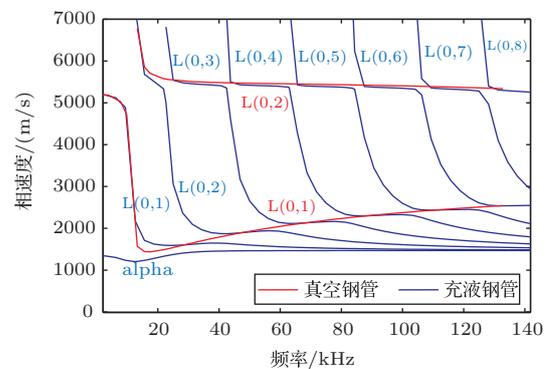


图4 真空(红色)钢管和充液(蓝色)钢管相速度频散曲线

Fig. 4 Dispersion curves of the vacuum (red) and fluid-filled (blue) steel pipe

进一步的,计算内部充液钢管的导波模式。由于套管井中心的声系可近似为钢管,而钢管声阻抗率比周围的流体大得多,因此可以用刚性圆柱体来模拟中心的声系。计算了内部充液钢管的相速度频散曲线,得到声源频率100 kHz附近的轴对称纵向模式,具体如图4中蓝色曲线所示。对比两种模型下的频散曲线可以看出,充液钢管除新增的 α (alpha)模式^[15]以外,它与真空钢管中的轴对称纵向模式有很多一致性。代表真空钢管的L(0,2)和L(0,1)模式的红色曲线在充液钢管中被分割成几个部分,具体为充液钢管中的L(0,2), ..., L(0,7)模式在各自截止频率处为无限大值,随着频率增加,相速度值迅速减小并趋于原真空钢管中L(0,2)模式的相速度值附近,此后一段频率内相速度值趋于平稳,不随频率变化,出现速度“平台”现象。速度“平台”的概念在M.Redwood^[16]、王晶^[17]等的研究

工作中都有提及,这里不再赘述。分析各个模态在速度“平台”处的总体频散变化趋势,发现它们和真空钢管中L(0,2)模态的频散曲线相一致;且充液钢管中后一个模态在速度“平台”处的起始频率和前一个模态在速度“平台”处的终止频率相隔很近;另外由Wang^[18]等的研究成果可知,充液钢管在此速度“平台”上模态的群速度频散关系、波结构等都和相同的频率下真空钢管中L(0,2)模态相似,因此将充液钢管的各个纵向轴对称模态的相速度值趋于原真空钢管中L(0,2)模态相速度值所组成的一系列速度“平台”统称为PL(0,2)速度“平台”,并在后文的图中用PL(0,2)代指此速度“平台”处充液钢管的相关模态。继续观察充液钢管的频散曲线,可看到随着频率增大,充液管中的L(0,2), \dots ,L(0,7)模态相速度值又迅速变小至原真空钢管中的L(0,1)模态的相速度值后趋于稳定,各自有一段频率内的速度“平台”特征,这些速度“平台”处的模态频散变化和真空钢管中L(0,1)模态的频散曲线相一致,类似的把充液管中趋于原真空钢管中L(0,1)模态相速度值所组成的不同频率段的速度“平台”统称为PL(0,1)速度“平台”,并在后文图表中,用PL(0,1)代指此速度“平台”处充液钢管的相关模态。图5给出PL(0,2)和PL(0,1)速度“平台”上相关模态在60 kHz到120 kHz内相速度随频率变化的曲线。

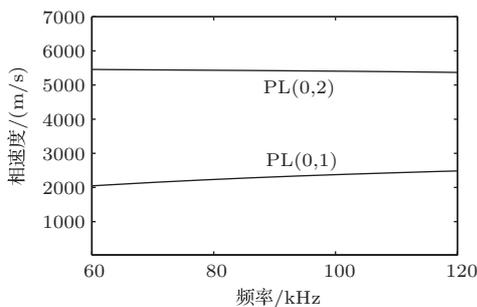


图5 PL(0,2)和PL(0,1)的相速度频散曲线

Fig. 5 Dispersion curves of PL(0,2) and PL(0,1)

继续分析内外均充液钢管的频散特性,这方面有很多的研究工作^[19-21],本文仅列举Long^[20],Sinha^[21]的研究成果。Long^[20]计算了10 in钢管在内充液外真空和内外充液两种情况下的相速度频散曲线,对比后得出结论:与内充液外真空钢管相比,内外充液的钢管新增了 α_2 模态^[20],但新增的模态相速度值较小;另外当频率较高时,两个模型下的模态分布基本相同。Sinha^[21]计算了内充液外真

空和内外都充液的钢管频散曲线,也得到类似的结论。因此根据前人的工作可知当内外都充液时,会增加新的模态波S-T(α_2)模态,但此模态波的相速度值较小;且在高频范围内,除新增的模态波,相同频率下的模态分布和内充液外真空的钢管基本相同,因此在固井检测中,对于使用高频声源的SBT(100 kHz),可以通过控制接收时间减少甚至忽略这些外部流体对充液钢管带来的影响。

纵观三种情况下的频散曲线,可以看到当声波入射到钢管时,会激发出多种模态导波,考虑到内外充液钢管和内充液外真空钢管的模态在高频处差异不大,将以内充液外真空的钢管频散特性作为研究测井模型的物理基础。

2.2 用斜入射声源激发钢管模态

鉴于导波的多模态性,在一定范围的声源频率内,若能激励单独的PL(0,1)或者PL(0,2)速度“平台”处的模态,压制其他模态,可以一定程度上控制多模态现象,简化问题的分析。在实际操作中一般使用斜楔以纵波入射法在管中激发单一导波模态^[11]。因此在下文中,类似的将声源斜向放置,来激励单一速度“平台”处的模态,并利用速度“平台”上的模态检测水泥胶结质量。

由Snell定理,当声波由流体入射到波导来激励速度“平台”上模态波时,入射角 θ_i 满足以下公式:

$$\sin(\theta_i) = V_f/V_L, \quad (2)$$

其中 V_f 为流体声速, V_L 为速度“平台”的相速度值。根据PL(0,1),PL(0,2)速度平台处的相速度频散曲线,得到入射角与频率的关系,如图6所示。PL(0,1)、PL(0,2)在100 kHz频率附近对应的有效激励角度分别约为 40° 和 16° 。

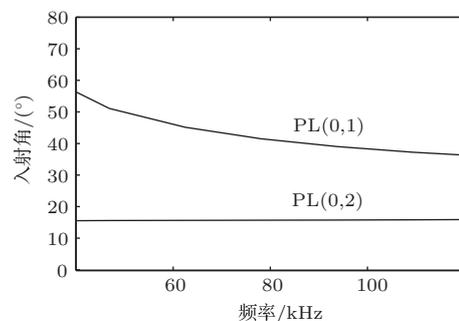


图6 入射角和PL(0,1),PL(0,2)的频散关系

Fig. 6 The incidence angle of PL(0,1) and PL(0,2) versus frequency

利用旋转交错网格有限差分算法数值模拟了斜入射声源在简化模型(充液钢管)中激发的声场。斜入射声源通过多个点声源的叠加来实现^[14]。在SBT的发射器、远接收器组成的螺旋线上取一系列的点作为接收点,以分析声波的传播规律。接收点上波形结果如图7所示,图7(a)、7(b)分别代表入射角度为16°和42°,图7中纵轴表示螺旋线上的接收点离声源的距离,为了能清楚的显示所有信号,每个信号的放大倍数和源距成正比。除了接收波形,图7中还有黑色、红色的斜实线,它们的斜率分别等于PL(0,2)、PL(0,1)速度“平台”的速度值。从图7中可以看出,当使用不同入射角度时,可以激发不同的声场。当入射角度是16°时,由首波到时计算出的相速度为5200 m/s,和PL(0,2)的相速度值相接近,说明激发了PL(0,2)速度“平台”处相关模态波。当入射角度为42°时,由首波到时计算出的相速度和PL(0,1)的相速度相近,说明激发PL(0,1)速度平台处相关模态波。这说明对于简化模型,可以选择恰当的入射角时来激励所需模态波而压制另外模态。此外,对比图7(a)、7(b)可以看出,42°斜入射时全波中成分更单纯,波形更为干净,结合套管井检测的实际情况,较为干净的接收波形更有利于实际检测,

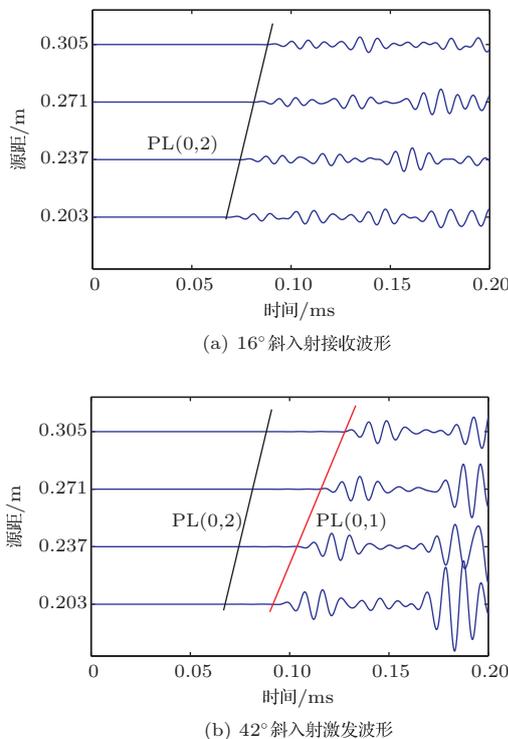


图7 两个斜入射角度下的接收波形

Fig. 7 Simulated waveforms with different oblique incidence angle

因此采用42°作为斜入射角度来检测第一二界面窜槽。

3 数值算例与结果分析

3.1 第一界面窜槽

对套管井简化模型的数值模拟说明了可以选择恰当的入射角来激励相应速度“平台”上的模态波而压制另外模态。但是在实际套管井中,套管外还存在多层介质,包括水泥环和无限大地层,这使得实际套管井结构和简化模型相比更为复杂。为了验证激励速度“平台”上的模态波检测水泥环胶结质量的有效性,用有限差分算法数值模拟了斜入射声源在不同胶结套管井中激励的声场。

以第一界面窜槽套管井声场为例,套管井的物理参数和结构参数如表1所示,窜槽用5 mm厚度的水层代替,声源频率为100 kHz,发射接收同图7,接收到的波形如图8所示。由首波到时计算出的相速度和PL(0,1)的相速度相近,说明在套管井声场中,42°斜入射能激发PL(0,1)速度平台上相关模态波形成首波波包。

表1 各弹性介质的声学参数

Table 1 Parameters of all layers in the numerical examples

介质	纵波速度 (m/s)	横波速度 (m/s)	密度 (kg/m ³)	外半径 (m)
流体	1470	-	1000	0.066
钢管	6000	3200	7800	0.076
水泥	2800	1700	1900	0.103
地层	3630	2200	2300	∞

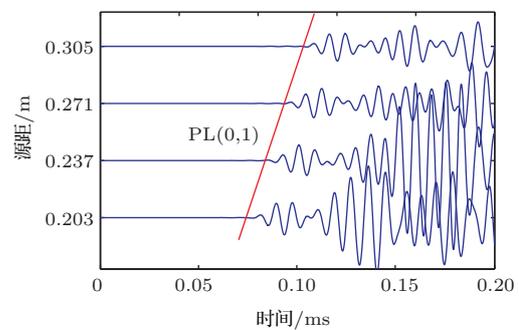
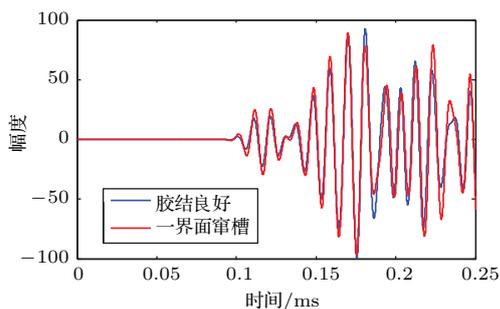


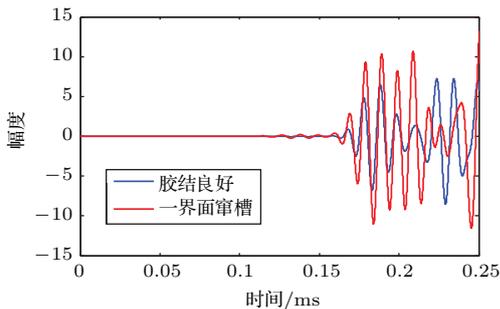
图8 第一界面窜槽套管井声场

Fig. 8 Full waveforms of the cased well debonding at the first interface

提取一界面完全脱粘套管井和胶结良好套管井在R2、R3接收点上的波形进行对比分析,具体波形见图9。从图9中可以看出,PL(0,1)速度平台上相关模态波形成首波波包对钢管外是否存在流体敏感。当第一界面存在流体时,首波波包的整体幅度明显增大,因此可通过提取首波波包中的第一个负极值来计算声衰减系数,作为判断此扇区是否存在窜槽的依据,声衰减系数公式同见文献[12]。



(a) R2接收到的波形



(b) R3接收到的波形

图9 第一界面窜槽和胶结良好套管井中接收器接收到的波形

Fig. 9 Full waveforms at different receivers

为了证明激发PL(0,1)速度“平台”处相关模态检测第一界面局部窜槽的可行性以及能检测的最小环向窜槽,分别计算了存在 12° 、 15° 、 30° 至 210° 的第一界面窜槽的套管井,得到最小衰减率值和窜槽环向宽度间关系如图10所示。从图10中可以看到,随着窜槽环向宽度增加,最小衰减率值绝对值减小,当窜槽环向宽度大于 90° 后,衰减率值趋于一致,变化不大。这说明衰减率值和窜槽环向宽度存在一定关系,可以根据最小衰减率值判断是否存在窜槽。另外当环向窜槽大于等于 30° 时,最小衰减率值和胶结良好时差值大于 3 dB/ft ,有利于判断是否存在窜槽;而当窜槽小于 30° 时,最小衰减率值和胶结良好时差值小于 3 dB/ft ,不利于判断是否存在

窜槽,这说明利用斜入射声源激发PL(0,1)速度“平台”处相关模态能检测第一界面上环向局部水泥缺失且至少能检测小至 30° 的水泥缺失。

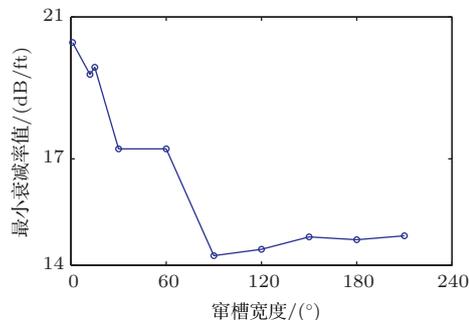


图10 第一界面窜槽环向宽度和最小衰减率绝对值的关系

Fig. 10 The relationship between absolute value of minimum attenuation and debonding area

3.2 第二界面窜槽

继续研究第二界面存在窜槽的套管井声场。当PL(0,1)速度“平台”处的模态波被激励传播后,会透过水泥层向地层辐射声波,当第二界面脱粘时,将有部分声波从水泥-流体界面上反射回套管,在套管上形成新的次生模态波,如此往复。为称呼方便,将PL(0,1)速度“平台”处模态波首次经水泥环反射后回到套管形成的次生模态波称为 $PL'(0,1)$ 。

为了对次生模态波和第二界面窜槽之间的关系有个直观的认识,数值模拟了胶结良好和第二界面完全脱粘套管井的声场,并利用声场快照图对比观察第二界面完全脱粘套管井声场中 $PL'(0,1)$ 的产生及传播情况。鉴于发射和接收换能器位于圆柱螺旋线截取套管井模型产生的斜截面上,为了更清楚的显示 $PL'(0,1)$ 的传播,截取了T1和R3之间的部分截面(图11中灰色部分)在 $x-y$ 投影上的声场波动作为声场快照图。图12即为不同时刻的声场快照图,图12中红色实心椭圆为刚性圆柱体,三条黑色弧线从内至外分别代表钢管内、外半径和水泥外半径,最外面的蓝色区域表示位于吸收层外区域,全部为预定义数,和套管井声场无关。图12(a)、12(c)为胶结良好,图12(b)、12(d)为二界面完全脱粘的套管井声场,且图12(a)、12(b)同为 0.1 ms 时刻声场快照,图12(c)、12(d)同为 0.12 ms 时刻的声场快照。对比图12(a)和12(b):图12(a)为 0.1 ms 时刻,向外

辐射的声波到达第二界面处后,由于二界面胶结良好,水泥和地层的声阻抗率差别不大,大部分的声波向外辐射到地层;而在图12(b)中,由于第二界面完全脱粘,在水泥和地层之间有5 mm 厚的流体层,使得从水泥到液体,液体到水泥出现很大的声阻抗率变化,因此PL(0,1)速度“平台”处模态波到达二界面后反射特征明显加强,有很大一部分声波在第二界面处发生反射,向套管内传播,生成了次生模态波PL'(0,1)。同样地对比图12(c)和12(d),在0.12 ms时刻:当套管井胶结良好时,速度“平台”处模态波基本上都沿着环向和轴向向地层外传播;而当第二界面脱粘时,声波到达第二界面后,有很大一部分的声波发生反射,向套管内传播,形成次生模态波PL'(0,1)。这些快照图展示了次生模态波PL'(0,1)的产生过程及传播规律,说明了经水泥环反射回套管波产生的次生模态波PL'(0,1)与二界面流体有

关,可以用于检测第二界面的胶结质量。

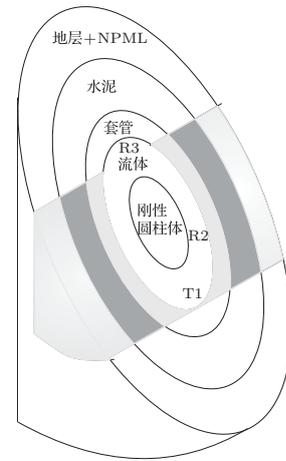


图11 发射接收斜截面

Fig. 11 Oblique section with transmitter and receiver

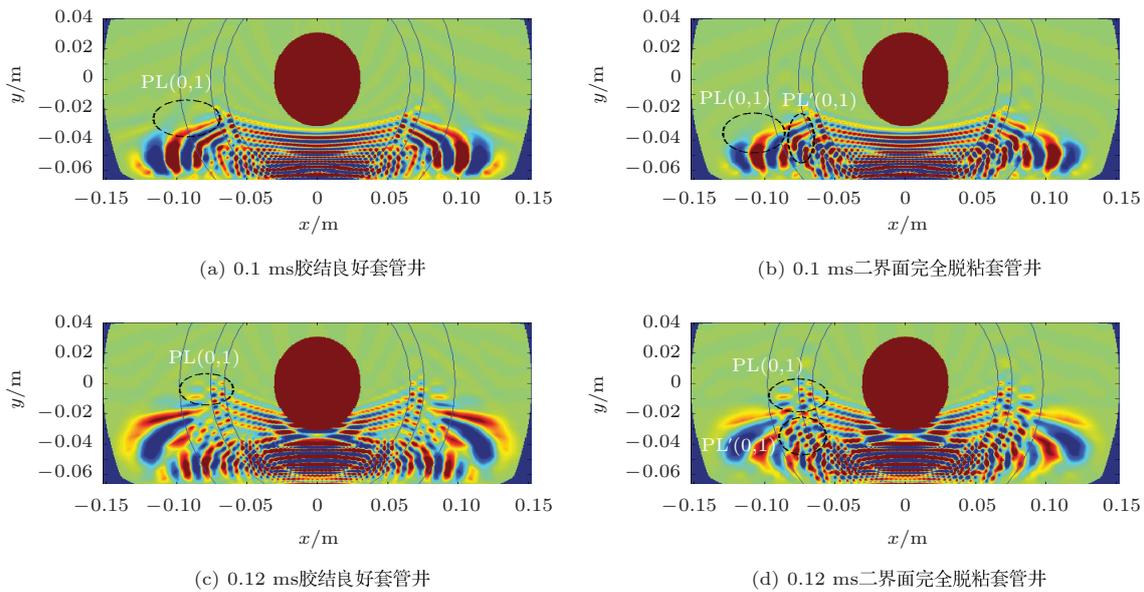


图12 斜入射时不同胶结情况套管井内声场快照图

Fig. 12 Simulated snapshots

下面具体分析R2、R3两个接收点所接收波形中的次生模态波信息。图13给出了两个接收点在一段时间内的波形。根据次生模态波的传播路径特征可计算得到其到达接收点的时间,在图13(a)、13(b)中均用箭头示意其到达R2、R3的时间,且用方框表示了次生模态波到达后的部分波包。从整个接收波形上看,此部分波包也就是整个波形中的第二个波

包。对比不同胶结状况套管井中的波形可知,次生模态波对第二界面胶结情况敏感,当第二界面脱粘时,次生模态波幅度明显增大,可应用次生模态波来检测第二界面的胶结状况。考虑到次生模态波的到达时间,可通过提取接收波形中第二个波包的第一个极大值作为次生模态波幅值来判断第二界面胶结情况。

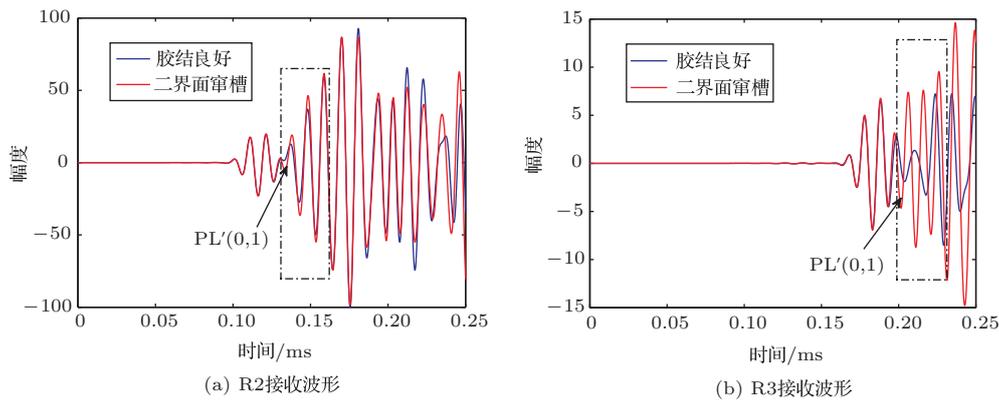


图13 二界面完全脱粘和胶结良好两种套管井中的R2、R3接收波形

Fig. 13 Full waveforms at different receivers

进一步模拟了第二界面环向存在不同水泥缺失的套管井声场,考察环向局部水泥缺失时应用此方法的有效性以及能检测的最小第二界面窜槽。模拟了第二界面环向存在 15° 至 210° 窜槽的套管井声场,计算各个扇区的衰减率,得到最小衰减率绝对值和窜槽环向宽度关系如图14所示。从图14中可看出,随着窜槽环向宽度增大,最小衰减率值绝对值减小,当窜槽角度大于 90° 后,衰减率值趋于一致。这说明衰减率值和窜槽存在一定关系,可以根据最小衰减率值判断是否存在窜槽。为了确定能检测的最小环向窜槽,分别考察 15° 和 30° 窜槽套管井。当窜槽大小为 15° 时,它和胶结良好时的衰减率值差值小于 3 dB/ft ,不利于判断是否存在窜槽;而当窜槽为 30° 时,衰减率值和胶结良好差值大于 3 dB/ft ,利于判断是否出现窜槽。这说明当用斜入射声源法激发 $PL(0,1)$ 速度平台处模态,其产生的次生模态波能用于检测第二界面的胶结质量,且能检测出小至 30° 的第二界面环向水泥缺失。

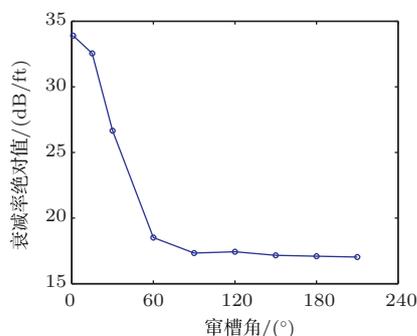


图14 第二界面窜槽环向宽度和最小衰减率绝对值的关系

Fig. 14 The relationship between absolute values of minimum attenuation and debonding area

4 结论

本文围绕分扇区水泥胶结测井中的固井质量检测问题进行研究,提出利用斜入射声源激励 $PL(0,1)$ 速度“平台”上的模态波及其反射波信息来检测第一、二界面的胶结状况的方法。计算和分析表明,斜入射声源在套管井中激励相应 $PL(0,1)$ 速度“平台”上模态波,该模态波对一界面的胶结情况敏感,且其在第二界面上反射后可形成次生模态波。因此,第一界面水泥胶结质量的定量检测可以通过直接利用该模态波的幅度衰减来实现,第二界面水泥胶结质量的定量检测可通过应用次生模态波的幅度衰减来进行。总的来说,本文对SBT声系的改进使得SBT能在一定程度上对第二界面水泥胶结质量进行定量检测,为套管井第二界面水泥胶结质量的定量检测提供了研究基础。

参 考 文 献

- [1] 黄琳, 张嘉伟. 扇区水泥胶结固井质量测井仪介绍及其应用分析[J]. 科技视界, 2014, (3): 12-13.
HUANG Lin, ZHANG Jiawei. The introduction and applied analysis for segmented bond tool[J]. Science & Technology Vision, 2014, (3): 12-13.
- [2] 沈建国, 陈宇, 卢克安. 圆管内的偏心声源在圆管内外激发的声场[J]. 声学学报, 2003, 28(5): 475-480.
SHEN Jianguo, CHEN Yu, LU Kean. The acoustic field of pipe generated by eccentric source in the liquid[J]. Acta Acustica, 2003, 28(5): 475-480.
- [3] ZHANG H. Field of circumferential acoustical logging devices[C]//Ultrasonics Symposium, 1993. Proceedings, IEEE, 1993: 827-830.

- [4] 张秀梅, 孙建孟, 陈雪莲, 等. 扇区水泥胶结测井 (SBT) 响应的数值模拟 [J]. 测井技术, 2004, 28(6): 515–517.
ZHANG Xiumei, SUN Jianmeng, CHEN Xuelian, et al. Numerical simulation of the logging response of segmented bond tool (SBT)[J]. Well Logging Technology, 2004, 28(6): 515–517.
- [5] 何峰江, 陶果, 王锡莉. 贴井壁声波测井仪的有限差分模拟研究 [J]. 地球物理学报, 2006, 49(3): 923–928.
HE Fengjiang, TAO Guo, WANG Xili. Finite difference modeling of the acoustic field by sidewall logging devices[J]. Chinese J. Geophys., 2006, 49(3): 923–928.
- [6] 宋若龙, 刘金霞, 姚桂锦, 等. 非轴对称套管井中声场的并行有限差分模拟 [J]. 地球物理学报, 2010, 53(11): 2767–2775.
SONG Ruolong, LIU Jinxia, YAO Guijin, et al. Parallel finite difference modeling of acoustic fields in nonaxisymmetric cased hole[J]. Chinese J. Geophys., 2010, 53(11): 2767–2775.
- [7] ROSE J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 125–128.
- [8] GAZIS D C. Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I. analytical foundation[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1959, 31(5): 568–573.
- [9] SILK M G, BAINTON K F. The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to Lamb waves[J]. Ultrasonics, 1979, 17(1): 11–19.
- [10] BROOK M V, NGOC T D K, EDER J E. Ultrasonic inspection of steam generator tubing by cylindrical guide waves[M]//THOMPSON D O, CHIMENTI D E. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation. US: Springer, 1990, 9: 243–249.
- [11] 何存富, 吴斌, 范晋伟. 超声柱面导波技术及其应用研究进展 [J]. 力学进展, 2001, 31(2): 203–214.
HE Cunfu, WU Bin, FAN Jinwei. Advances in ultrasonic cylindrical guided waves techniques and their applications[J]. Advances in Mechanics, 2001, 31(2): 203–214.
- [12] 魏涛. 油气井固井质量测井评价 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 157–181.
- [13] ZERONG S, FROELICH B. Ultrasonic leaky-Lamb wave imaging through a highly contrasting layer[C]//Ultrasonics, 2003 IEEE Symposium on. IEEE, 2003, 1: 794–798.
- [14] HE X, CHEN H, WANG X. Ultrasonic leaky flexural waves in multilayered media: Cement bond detection for cased wellbores[J]. Geophysics, 2014, 79(2): A7–A11.
- [15] ARISTEGUI C, LOWE M J S, CAWLEY P. Guided waves in fluid-filled pipes surrounded by different fluids[J]. Ultrasonics, 2001, 39(5): 367–375.
- [16] REDWOOD M, LAMB J. On the propagation of high frequency compressional waves in isotropic cylinders[J]. Proc. Phys. Soc. London, Sect. B, 1957, 70(1): 136.
- [17] 王晶, 陈德华, 张海澜, 等. 外表面应力自由的充液有限壁厚井孔中的声场及其频散曲线的“平台”特征 [J]. 声学学报, 2012, 37(3): 232–236.
WANG Jing, CHEN Dehua, ZHANG Hailan, et al. Wave-field in a fluid-filled cylindrical shell with outside traction-free boundary conditions and its “plateau” characteristics in dispersion curves[J]. Acta Acustica, 2012, 37(3): 232–236.
- [18] WANG W, CHEN D. Axisymmetric wave dispersion in outside traction-free fluid-filled cylindrical shells[C]//Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA), 2013 Symposium on. IEEE, 2013: 1–5.
- [19] NA W B, KUNDU T. Underwater pipeline inspection using guided waves[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2002, 124(2): 196–200.
- [20] LONG R, CAWLEY P, LOWE M. Acoustic wave propagation in buried iron water pipes[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2003, 459(2039): 2749–2770.
- [21] SINHA B K, PLONA T J, KOSTEK S, et al. Axisymmetric wave propagation in fluid-loaded cylindrical shells. I: Theory[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1992, 92(2): 1132–1143.