

陈雪莲, 庄妍, 夏飞月等. 2022. 在套管中激发环向传播的准 SH 波的有限元模拟及实验研究. 地球物理学报, 65(4):1519-1527, doi:10.6038/cjg2022P0257.

Chen X L, Zhuang Y, Xia F Y, et al. 2022. Finite element simulation and experiment study on exciting quasi-SH wave circumferentially in the casing. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 65(4):1519-1527, doi:10.6038/cjg2022P0257.

在套管中激发环向传播的准 SH 波的有限元模拟及实验研究

陈雪莲^{1,2}, 庄妍^{1,2}, 夏飞月^{1,2}, 殷晓康³, 唐晓明^{1,2*}

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 中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东青岛 266580

摘要 目前评价固井质量的声波测井方法均是在井内泥浆中辐射声波,再耦合到套管中激发套管波,这种测量方式在重泥浆或含气的井筒内应用时受到了限制,本文将电磁超声换能器引入到套管井中,无需井内介质的声耦合直接在套管中激发沿着套管轴向偏振、周向传播的准 SH 波.利用多物理场有限元仿真技术优化设计了磁盘阵列式的偏置磁场和跑道型线圈结构的电磁超声换能器,基于洛伦兹力机理实现了在铁磁材料的套管中激发和接收环向传播的准 SH 波的电磁超声转换技术.根据优化设计结构在实验室研制了电磁超声换能器,有限元模拟和实验室测量均观测到了沿套管环向传播的零阶及一阶准 SH 波.有限元模拟结果还显示在胶结良好的套管井中,准 SH 波一边沿着套管环向传播,一边向水泥环中辐射准 SH 波;在水泥和地层界面准 SH 波还会发生反射,再耦合到套管中被接收器接收到,通过对比硬地层和软地层两种套管井模型中接收的反射波信息,可观测到反射的准 SH 波相位相反,反射波和直达波的相位变化充分验证了准 SH 波的传播特征.

关键词 电磁超声换能器;洛伦兹力;准 SH 波;套管井

doi:10.6038/cjg2022P0257

中图分类号 P631

收稿日期 2021-04-21, 2021-11-25 收修定稿

Finite element simulation and experiment study on exciting quasi-SH wave circumferentially in the casing

CHEN XueLian^{1,2}, ZHUANG Yan^{1,2}, XIA FeiYue^{1,2}, YIN XiaoKang³, TANG XiaoMing^{1,2*}

1 School of Geosciences, China University of petroleum, Qingdao Shandong 266580, China

2 Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of petroleum, Qingdao Shandong 266580, China

3 School of Mechanical and Electronic Engineering, China University of petroleum, Qingdao Shandong 266580, China

Abstract For acoustic logging methods in a cased well, the conventional working pattern is that the acoustic wave is excited in the mud and radiates into the casing, and then the casing wave is induced. This way is not efficient in heavy-weight or gassy mud. This paper introduces the electromagnetic acoustic transducer (EMAT) based on Lorentz force mechanism into the cased well. The advantages of EMAT are that the quasi-SH waves can be induced in the casing directly without acoustic

基金项目 国家自然科学基金(41774141,41821002),中石油重大科技项目(ZD2019-183-004)资助.

第一作者简介 陈雪莲,女,1976年生,副教授,2006年获中国石油大学(华东)地质资源与地质工程专业博士学位,主要从事声波测井方法及岩石物理的教学和科研工作. E-mail: chenxl@upc.edu.cn

*** 通讯作者** 唐晓明,男,1955年生,教授,博士生导师,1990年获麻省理工学院理学博士,主要从事地球物理(特别是声波)测井、岩石物理学、地震波传播及测量等方面的研究和技术开发工作. E-mail:tangxiam@aliyun.com

coupling between mud and casing. The quasi-SH waves are polarized in the axial direction and propagates circumferentially. Combining the COMSOL finite element simulation the Lorentz force type electromagnetic ultrasonic transducers are designed and optimized. Quasi-SH₀ and higher modes can be excited in the casing. The electromagnetic ultrasonic transducers based on the simulation results recorded the SH waves propagating circumferentially along the casing in the laboratory. In a well-bonded well, quasi-SH waves propagate along the casing circumferentially and leak energy into the cement behind the casing, and the leak quasi-SH waves can be reflected at the interface between cement and formation. Then the reflected waves can be coupled into the casing and received by the receivers. In hard and soft formation cased well models, the reflected waves are in opposite phases. Comparing with direct waves, the phase changes of reflected waves fully verify the propagation characteristics of quasi-SH waves.

Keywords Electromagnetic acoustic transducer; Lorentz force; Quasi-SH wave; Cased well

0 引言

固井是完井作业中关键的一环(吴铭德等, 2016),常用声幅和变密度测井测量的套管波和地层波幅度评价套管-水泥界面(第一界面)和水泥-地层界面(第二界面)的胶结程度(唐军等, 2016),目前也开始研究利用套管波的频散评价水泥环第二界面的胶结状况(唐晓明等, 2018). 后来发展的扇区水泥胶结测井(魏涛, 2010)和水泥声阻抗类测井,具有较高的环向分辨能力,可以检测到水泥环局部水泥缺失. 但声阻抗类测井在轻质水泥固井质量评价中的应用受到了很大的挑战,由于轻质水泥与泥浆的声阻抗差异较小,测量结果对不同胶结状况下的响应差异明显降低(Wang et al., 2016). 另外,现有的这些测量方式的声源均处在井内流体中,声源辐射的声波需要借助井内泥浆耦合到套管中(贴井壁的扇区水泥胶结测井也需要泥浆润湿贴壁滑板和套管之间接触面),这在重泥浆或储气库等含气的井筒内测量时由于声波的衰减严重,应用也受到了很大的限制.

Baker Hughes 推出的井筒完整性评价服务,将电磁超声换能器(Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT)引入到套管井固井评价中,其在套管中激发沿套管轴向偏振、环向传播的准 SH 波(Tang et al., 2009, 2010; Patterson et al., 2016; 陈雪莲和唐晓明, 2019, 2020),这里称准 SH 波是区别于平界面中 SH 波的传播特征. 电磁超声换能器具有无需耦合剂、非接触等优点,能够直接在套管中激发准 SH 波(Tang et al., 2009, 2010; 黄松岭等, 2013, 2018),因此其在含气或重泥浆井筒中的应用具有明显的优势;准 SH 波在具有多层介质耦合的套管中

传播时不发生模式转换,有利于提高信号的检测效率;研究还表明测量的准 SH 波衰减对轻质水泥胶结好坏具有更大的动态范围. 虽然电磁超声技术在国内的无损检测领域已得到广泛应用,但针对 EMAT 在套管中激发准 SH 波开展固井评价的研究在国内还未见报道,基于此,本文利用 COMSOL 多物理场有限元仿真技术,研究了如何在套管中激发准 SH 波的方法. 在无损检测领域,电磁超声换能器主要有磁致伸缩和洛伦兹力两种工作机理,例如套管这种铁磁材料中,一般采用磁致伸缩型电磁超声换能器,Seung 等(2013)进行了磁致伸缩机理 EMAT 在平板中激发全向 SH 波的数值仿真和实验研究. 测井时需要换能器在井中从下向上匀速上提检测套后水泥的胶结质量,移动测量时,电磁换能器中的磁铁移动使得被测试样磁性变化(磁滞现象、动态涡流),磁致伸缩机制转换效率会受到影响. 但洛伦兹力机制的换能效率与激励电流和偏置磁场基本呈线性关系,在具有高电导率的套管中激发洛伦兹力时,套管磁性的变化不会显著影响洛伦兹力的转化效率(Karimi, 2020),因此洛伦兹力机制更具有稳定性. 另外,在钢材料中,使用非耦合的磁致伸缩机理 EMAT 激发的 SH 波振幅是洛伦兹力机理 EMAT 的 2%~70%(Ribichini et al., 2011),在套管内壁上附加高磁致伸缩性材料(如镍或铁钴合金),通过耦合剂粘结到试样上,换能效率可提高 5 倍(Ribichini et al., 2012),但耦合剂在井下套管中不适用,因此综合考虑电磁超声转换的稳定性、转换效率以及井下测量环境的影响,选择了基于洛伦兹力机理的电磁超声换能器在套管中激发准 SH 波. 大量的实验研究表明周期排列的磁铁可以减弱电磁超声换能器在铁磁材料中的磁致伸缩效应,磁体

NS 极性的周期配置结合跑道线圈结构的 EMAT (Periodic Permanent Magnet EMAT, 以下简称 PPM-EMAT) 在套管中引起的磁致伸缩作用可以忽略, 视为仅有洛伦兹力传导机制 (Masahiko and Hirotsugu, 2017). 本文在前人大量实验和模拟研究的基础上, 建立了磁盘阵列式的永磁体排列结构, 削弱磁致伸缩效应在套管中的影响, 结合跑道型线圈结构, 基于洛伦兹力机理仿真了在套管中激发环向传播的准 SH 波的电磁超声换能器, 优化设计结构也得到了实验验证. 并进一步探讨了套管-水泥-地层等多层介质模型下准 SH 波的反射和透射特征, 为一次测井可实现水泥环第一和第二界面胶结状况的同时评价奠定了理论基础.

1 洛伦兹力型电磁超声换能器的优化设计

为了实现 PPM-EMAT 在套管中激发准 SH 波的有限元模拟, 本文在 COMSOL Multiphysics 多物理场有限元模拟软件中建立了仿真模型, 模型由周期性排列的永磁体、跑道型线圈和被测试部件 (这里是指套管) 三部分组成. 如图 1a 所示, EMAT 工作时, 跑道型线圈中通入交变电流 J_m , 根据麦克斯韦

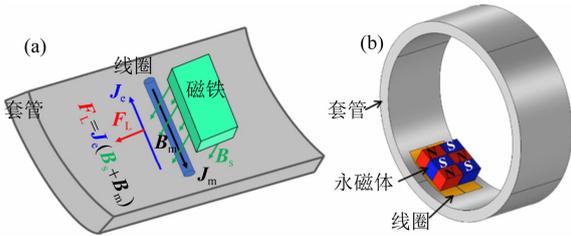


图 1 套管中激发准 SH 波的 EMAT 原理图 (a) 和模型示意图 (b)

Fig. 1 Principle diagram (a) and model Schematic diagram (b) of EMAT for exciting quasi-SH waves in a casing

方程, 导电套管中感生出交变磁场 B_m , 交变磁场在套管中引发出涡流 J_e , 涡流中的电子在永磁体产生的偏置磁场 B_s 中受到洛伦兹力 F_L 作用冲击晶格, 晶格产生受迫振动激发超声波. 仿真时使用的参数见表 1.

优化设计的 EMAT 模型中三组磁极组成的周期排列的永磁体放置在跑道型线圈的上方 (图 1b), 永磁铁中心底部到套管内壁的距离为 2.04 mm, 单个磁极宽度设置为需要激发的超声波的半波长, 磁极的极化方向沿着被测试件套管的径向 (r 方向) 方向, 其磁感应强度 B_s 设为 1.2 T, 为被测试件套管中的涡流提供偏置磁场. 在准静态情况下, 永磁体产生的静态磁场满足式 (1):

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0, \quad (1)$$

其中 \mathbf{H} 表示磁场强度. 永磁体在被测试件套管中产生的磁感应强度 B_s 可表示为

$$\mathbf{B}_s = \mu_s \mathbf{H}, \quad (2)$$

其中 μ_s 为套管的磁导率. 磁感应强度沿套管厚度的分布特征如图 2 中的黑实线所示, 套管内壁磁感应强度最大, 外壁最小, 沿厚度方向近似线性递减. 位于永磁体下方的跑道型线圈缠绕成多匝紧密排列的形式, 有利于在套管中产生较强的感应涡流. 跑道型铜线圈的匝数设置为 50 匝, 直线段近似与套管环向平行, 线圈与套管内壁之间的提高距离是 1.14 mm. 线圈加载频率为 f 的交变电流 i , 仿真时使用的电流信号如式 (3):

$$i(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi t}{T} \right) \cos 2\pi f \left(t - \frac{T}{2} \right), & 0 \leq t \leq T \\ 0, & t < 0 \text{ 或 } t > T \end{cases} \quad (3)$$

式中 T 为脉冲宽度, 线圈中平均电流密度 J_m 为

$$\mathbf{J}_m = \frac{i}{S}, \quad (4)$$

表 1 仿真参数表

Table 1 Simulation parameters

磁铁 (NdFeB)		套管 (钢)		线圈 (铜)	
尺寸 (x, y, z)	15, 12, 20 mm	外径	177.8 mm	尺寸 (θ, z)	$0.24\pi, 20$ mm
磁极个数	2×3	厚度	10.36 mm	匝数	50
提高距离	2.04 mm	电导率	$4.03 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$	提高距离	1.14 mm
剩余磁通密度	$\pm 1.2 \text{ T}$	相对磁导率	1000	电导率	$6 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$
回复磁导率	1.05	密度	$7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	相对磁导率	1
电导率	$1.15 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$	纵波速度	$6098 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	相对介电常数	1
相对介电常数	1	横波速度	$3354 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	—	—

式中 S 为单匝线圈的横截面积, 其在空间产生的交变磁场强度 \mathbf{H}_m 与平均电流密度的关系可表示为

$$\nabla \times \mathbf{H}_m = \mathbf{J}_m. \quad (5)$$

在套管中的磁感应强度 \mathbf{B}_m 与磁场强度满足式 (6) 中的本构关系:

$$\mathbf{B}_m = \mu_s \mathbf{H}_m. \quad (6)$$

跑道型线圈直线段中的交变电流在导电套管内壁趋肤深度 h 内产生与 \mathbf{J}_m 频率相同、方向相反的感应涡流 \mathbf{J}_e :

$$\mathbf{J}_e = -\sigma_c \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \quad (7)$$

$$\frac{1}{\mu_s} \nabla^2 \mathbf{A} - \sigma_c \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\mathbf{J}_m, \quad (8)$$

其中 \mathbf{A} 为矢量磁位, σ_c 表示套管电导率. 即在套管中产生环向的感应涡流, 感应电流时域信号见图 3 所示. 由于套管的高电导率, 感应涡流大小沿套管径向由内到外呈指数急剧递减 (见图 2 中的红线), 即感应涡流主要分布在趋肤深度 h 内:

$$h = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_m \sigma_c}}, \quad (9)$$

式中 $\omega = 2\pi f$ 为激励信号角频率, 在本文选定的工作频率下, h 约 0.22 mm. 感应涡流 \mathbf{J}_e 在静态磁场 \mathbf{B}_s 和动态磁场 \mathbf{B}_m 的共同作用下, 将在套管中产生振动频率为 f 的洛伦兹力 \mathbf{F}_L :

$$\mathbf{F}_L = \mathbf{J}_e \times (\mathbf{B}_s + \mathbf{B}_m). \quad (10)$$

根据右手法则, 洛伦兹力的方向垂直于偏置磁场方向 (沿 r 向) 和线圈中电荷的运动方向 (沿 θ 向), 即产生沿 z 方向的洛伦兹力. 在洛伦兹力作用下, 套管内部质点产生沿轴向 (z 方向) 振动, 当振动以波的形式沿套管环向传播时, 就实现了准 SH 波的声波发射过程. 质点运动方程为

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} - \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \mathbf{F}_L, \quad (11)$$

其中 λ 和 μ 为套管材质的拉梅常数, \mathbf{u} 表示套管内部质点位移 (套管中准 SH 波只有 z 方向的位移不为零). 由于趋肤效应, 感应涡流主要分布在套管内壁附近, 因此基于洛伦兹力 (图 2 中的蓝色实线) 激发的超声波也主要发生在套管内壁附近, 图 4 显示了初始 $2 \mu\text{s}$ 时 z 方向的振动位移分布. 在本文的工作频率下, 套管厚度小于波长, 洛伦兹力在套管内壁附近产生的超声波在沿着套管环向传播时可激发出沿着套管环向传播的准 SH 导波. COMSOL 有限元模拟时套管内充填的是空气, 若套管内充填水, 由于水的电导率仍远小于金属钢材质的套管, 对仿真结果的影响可以忽略, 另外井内是流体介质不传播

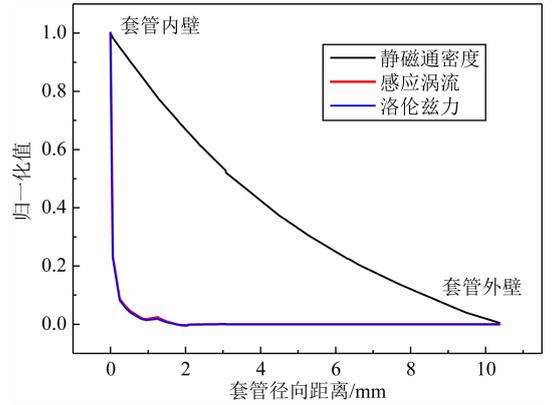


图 2 偏置的磁感应强度、感应涡流、洛伦兹力在套管厚度方向的分布规律
Fig. 2 Distribution of \mathbf{B}_m , \mathbf{J}_e and \mathbf{F}_L along the casing thickness direction

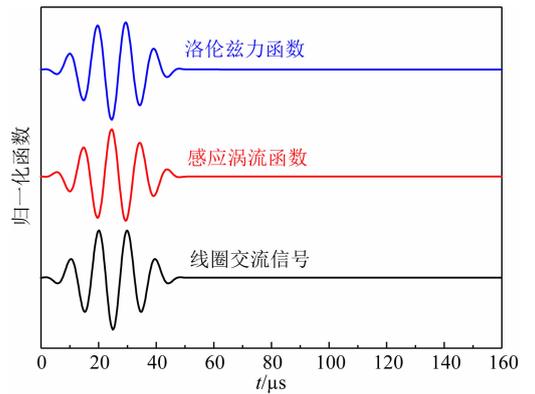


图 3 交变电流、感应涡流以及洛伦兹力的时间响应函数
Fig. 3 Time function of \mathbf{J}_m , \mathbf{J}_e and \mathbf{F}_L

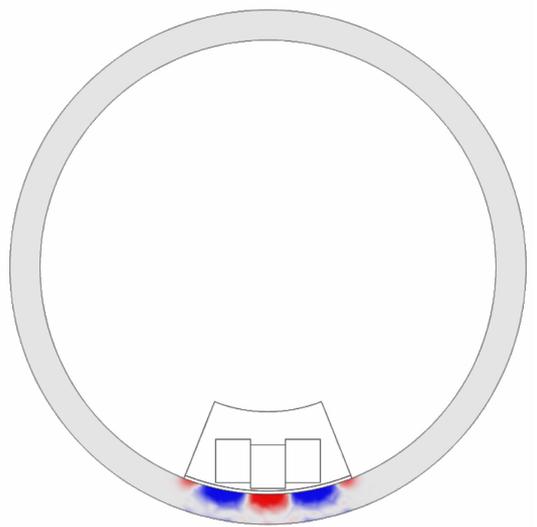


图 4 激发 $2 \mu\text{s}$ 时 z 方向的位移分布
Fig. 4 The z -directional displacement snapshot at $2 \mu\text{s}$ after exciting

SH 剪切波, 因此在本文模拟中未考虑井内泥浆对模拟结果的影响.

2 PPM-EMAT 的有限元模拟与实验测量结果

2.1 EMAT 工作频率的选择

沿着套管轴向偏振环向传播的准 SH 波可有多阶模态(罗斯, 2004), 零阶准 SH 波在零频附近其速度接近套管材质的横波速度, 随着频率的增加速度稍有降低, 频散很弱. 除了零阶准 SH 波不存在截止频率, 其他阶的准 SH 波均存在截止频率, 截止频率处的相速度趋于无穷大, 群速度趋于零. 图 5a 显示了 10.36 mm 厚度的套管(外径 177.8 mm)中准 SH 波的频散曲线(陈雪莲和唐晓明, 2019, 2020), 随频率的增加, 各阶模态的群速度和相速度逐渐趋近于套管的横波速度. 图 5b 显示了准 SH 波的激发强度曲线, 各阶模态的激发强度均是随着频率的增加逐渐减小, 在截止频率附近激发强度较大. 在激发频率较高时, 套管中可同时存在多阶模态的准 SH 波. 综合准 SH 模态的频散特征和激发强度曲线, 本文模拟 SH0 模态时电流源的中心频率选择为 100

kHz, 在主要激发准 SH1 模态时选择的电流源的中心频率是 200 kHz.

2.2 PPM-EMAT 的有限元仿真结果

将图 1b 描述的 PPM-EMAT 模型所在的套管环向方位设为 0° , 在逆时针的 $60^\circ \sim 120^\circ$ 范围内放置 z 方向的位移接收器, 可记录到 PPM-EMAT 激发的沿着套管环向传播的准 SH 波(从 PPM-EMAT 所处的方位向两侧的套管传播, 可分别视为逆时针方向和顺时针方向). 图 6a 是套管内外均为空气时记录的阵列波形, 方位间隔是 10° , 电流源的中心频率为 100 kHz, 在套管中仅激发零阶的准 SH 波, 随着方位角的逐渐增加, 沿逆时针方向传播的波包到时逐渐滞后, 沿顺时针方向传播的波包到时逐渐提前, 由于准 SH0 模式频散较弱, 不同方位接收的波形形态基本不变. 图 6b 是电流源中心频率为 200 kHz 时接收的准 SH 波, 可明显看到全波中首先到达的是频率和幅度均较低的准 SH0 模式, 幅度和频率均较高的准 SH1 模式紧随其后, 由于 SH1 是频散波, 随着传播距离的增加波形在时间域上的持续时间逐渐增长. 图 7 是两个中心频率下在套管中激

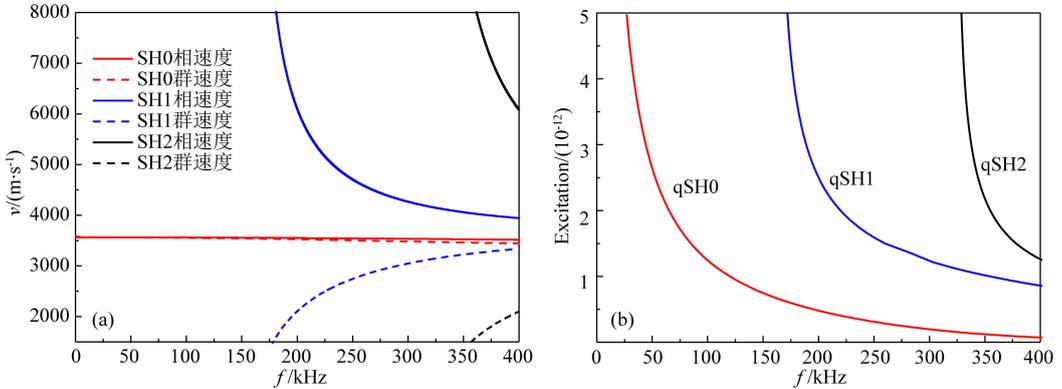


图 5 套管中准 SH 波的频散曲线(a)和激发强度曲线(b)

Fig. 5 Dispersion curves (a) and excitation curves (b) of quasi-SH waves in the casing

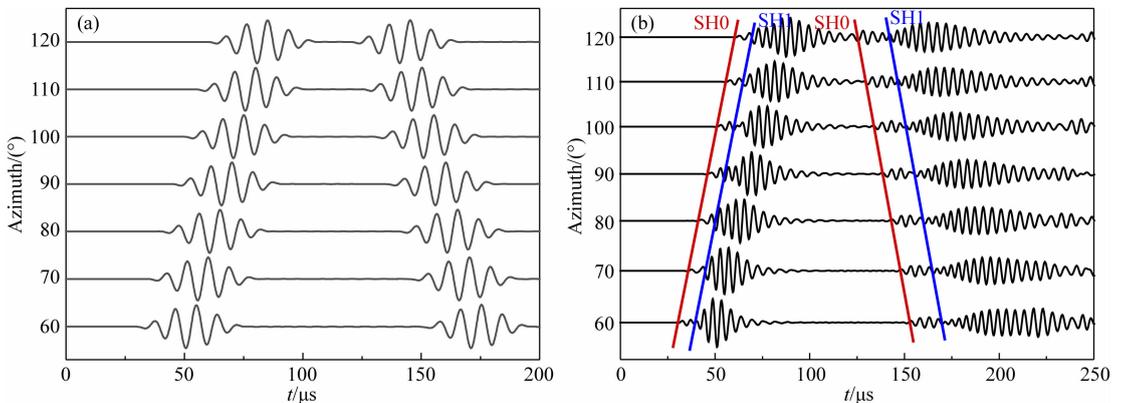


图 6 准 SH0 波列(a)和准 SH1 波列(b)的有限元模拟结果

Fig. 6 Simulation results of quasi-SH0 wave trains (a) and quasi-SH1 wave trains (b)

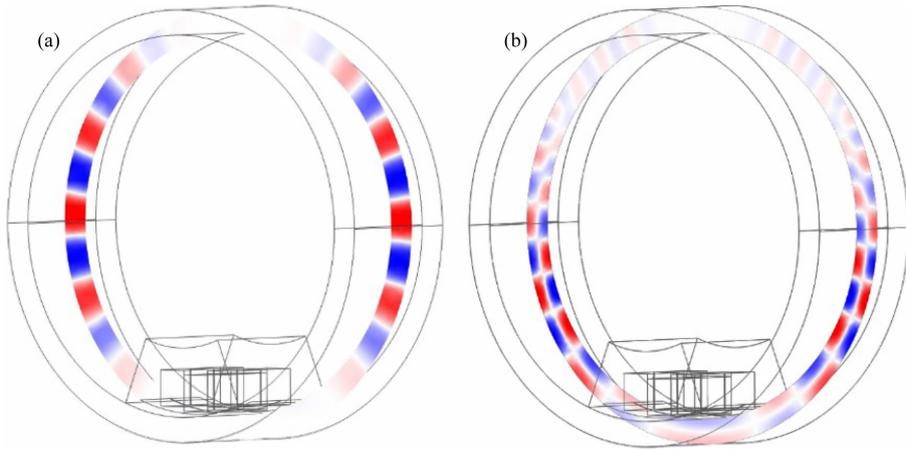


图 7 $70 \mu\text{s}$ 时准 SH0 波的位移场快照(a)和 $70 \mu\text{s}$ 时准 SH1 波的位移场快照(b)

Fig. 7 The quasi-SH0 (a) and the quasi-SH1 (b) wave field snapshots at $70 \mu\text{s}$

发的准 SH 波的声场快照,图 7a 是中心频率 100 kHz 的电流源激发 $70 \mu\text{s}$ 后套管截面的声场快照,可见在套管厚度方向上,振动位移的相位是一致的,符合零阶 SH 波的传播特征;在电流源的频率增加到 200 kHz 时,图 7b 的声场快照中,传播较快的是在套管厚度方向振动相位一致的准 SH0 模式,准 SH1 模式在套管厚度方向振动位移的相位变化一次,约在套管厚度的中间位置模式波的相位发生改变,振动幅度在套管内外壁较强,中间位置幅度最小。

在数值仿真时,套管内外的介质均是空气,由于套管是高电导率的金属材料,即便在套管内外充填高矿化度的水时,仿真结果与套管内是空气时基本一致,这也体现了 EMAT 在气井或重泥浆等高声衰减泥浆井中的适用优势.另外空气和水均是流体介质,与套管耦合时不传递剪切振动,因此,准 SH 波沿着套管环向传播时均不向外泄漏能量。

2.3 套管中 PPM-EMAT 的实验测试

根据在 COMSOL 优化设计的 PPM-EMAT 结构参数,在实验室制作了电磁超声换能器,并在实际套管中测量了沿着套管环向传播的准 SH 波,测量示意图如图 8 所示,实验用到的发射探头和接收探头分别由一组 2×3 的周期磁铁和 50 匝跑道型线圈组成,单个磁铁大小为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$,磁铁的间距可根据需要激发的准 SH 波的波长调节,跑道线圈的提离距离约 1 mm. RPR-4000 高功率脉冲发射接收器发射 4 个周期的 burst 信号,在距离发射探头环向 $60^\circ \sim 120^\circ$ 的方位上布置接收的电磁超声换能器,接收到的感应电流经阻抗匹配器后被 RPR-4000 高功率脉冲发射接收器接收。

图 9 分别显示了激发电流频率分别为 100 kHz

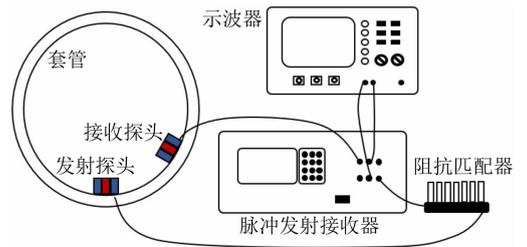


图 8 准 SH 波的实验测量装置

Fig. 8 Measuring equipment for quasi-SH waves

和 200 kHz 时接收的全波波形,波形特征与仿真结果一致(见图 6),接收探头记录到了沿套管逆时针方向和顺时针方向传播的准 SH 波,准 SH0 波在传播过程中波形形态基本不变,但 SH1 模式因频散波形持续时间较长。

3 套管后耦合水泥时准 SH 波的辐射特征

当套管后耦合水泥时,准 SH 波在套管中沿周向传播的同时,还会向水泥中辐射准 SH 波,泄漏能量.在自由套管模型的基础上,建立了二维的径向多层的套管井模型,模拟套管井中准 SH 波在环向的传播过程,声源主频为 100 kHz.图 10 是套管井模型中零阶准 SH 波传播的声场快照,水泥环厚度是 40 mm,水泥和地层胶结良好,地层无限厚.准 SH0 波一边沿套管周向传播,一边向水泥环中辐射准 SH0 波(图 10(b,c)),水泥环中的准 SH0 波传播到水泥与地层界面(第 II 界面)发生反射和透射(图 10(d,e)),透射到地层中的准 SH0 波向地层深处传播,反射回水泥环的准 SH 波在水泥与套管界面又被耦合到套管中沿着套管环向继续传播(图 10f)。

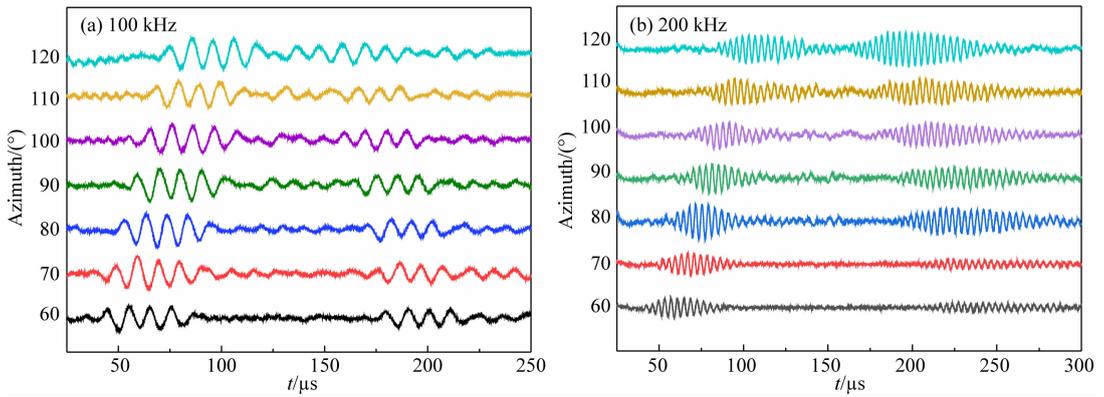


图 9 准 SH0 波列(a)和准 SH1 波列(b)的实验测量结果

Fig. 9 Experimental results of quasi-SH0 wave trains (a) and quasi-SH1 wave trains (b)

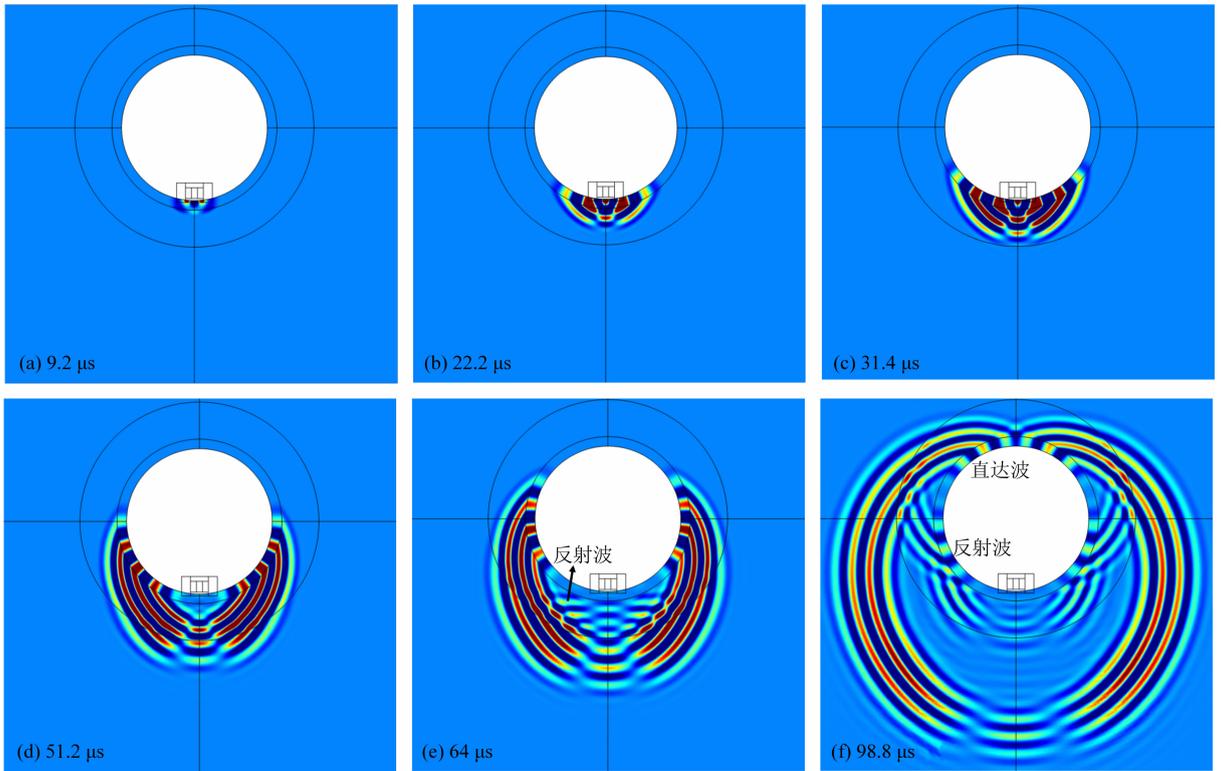


图 10 套管外耦合水泥及地层时准 SH0 波传播的声场快照

(a) EMAT 产生准 SH0 波; (b) 准 SH0 波辐射到水泥中; (c) 准 SH0 波到达第 II 界面; (d) 第 II 界面产生反射; (e) 第 II 界面反射波耦合到套管; (f) 耦合后沿着套管环向继续传播.

Fig. 10 Snapshots of quasi-SH0 wave propagation with well bonded condition

(a) EMAT excites quasi-SH0 wave; (b) Quasi-SH0 wave radiates into cement; (c) Radiated quasi-SH0 wave travels to cement-formation interface; (d) Reflected quasi-SH0 wave occurs; (e) Reflected quasi-SH0 wave is coupled to casing; (f) Reflected quasi-SH0 wave propagates in a casing.

在地层性质发生改变时,水泥-地层界面的准 SH 反射波幅度和相位也会发生改变,图 11 对比了方位角为 60° 时接收到的软、硬地层(地层横波阻抗大于水泥横波阻抗时称为硬地层,反之称为软地层)两种套管井模型下仿真的全波波形.模型中水泥横波阻抗 $3.2851 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,硬地层横波阻抗为 $5.75 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,软地层横波阻抗为

$3 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,由于硬地层的阻抗大于水泥的阻抗,软地层的小于水泥的阻抗,两种模型在水泥和地层界面的反射波相位正好相反,且硬地层情况下第一次反射波与直达波的相位相反,体现了准 SH 波在界面处的反射特征(与纵波的反射特征相反).从图 12 的声场快照中也可观测到软硬地层两种模型下第二界面的反射波相位相反,图中的绿色

箭头分别对应软硬地层模型的同一时刻的反射波,快照中的蓝色和红色代表的位移相位正好相反.另外,在硬地层模型的全波列中还可以观测到幅度较小的第二次反射波,第二次反射波相位与第一次相反(见图 12).因此不管在软地层或硬地层,在地层声阻抗已知的前提下,可以利用反射的准 SH 波的衰减及相位信息确定水泥环外侧耦合介质的声学信息,进而评价水泥环第二界面的胶结情况.

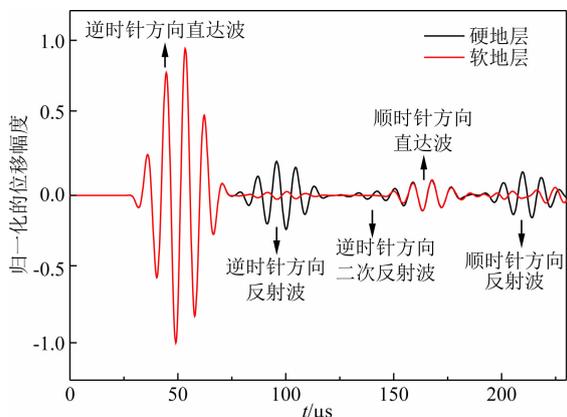


图 11 软、硬地层两种模型井下记录的全波波形
Fig. 11 Full waveforms of quasi-SH0 with soft and hard formations

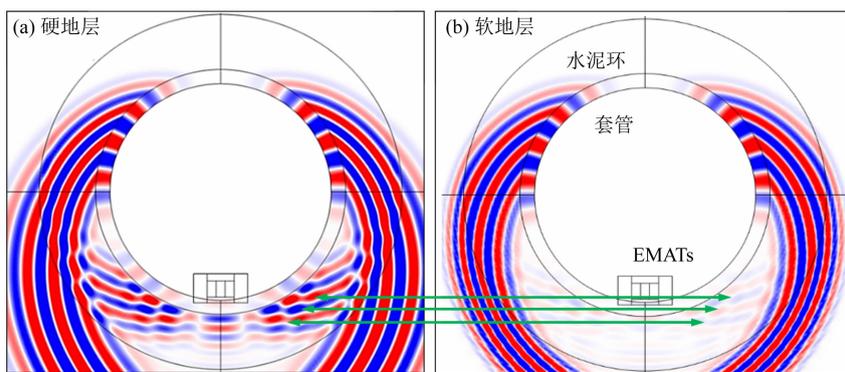


图 12 硬地层(a)和软地层(b)两种套管井模型下的声场快照对比

Fig. 12 Snapshot comparison between hard formation (a) and soft formation (b) cased well

References

- Chen X L, Tang X M. 2019. Study on three mode-wave sensitivities to material acoustic property behind casing in a cased well. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 62(4): 1565-1572, doi: 10.6038/cjg2019L0765.
- Chen X L, Tang X M. 2020. Propagation characteristics of quasi-SH waves propagating circumferentially in a casing. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 41(7): 895-902, doi: 10.6038/cjg2019L0765.
- Huang S L, Wang K, Zhao W. 2013. Theory and Application of Electromagnetic Ultrasonic Guided Wave (in Chinese). Beijing:

4 结论

本文通过多物理场耦合在铁磁材料的套管中实现了基于洛伦兹力的电磁超声换能器的优化设计和实验验证,主要结论如下:

(1)电磁超声换能器工作时贴近套管内壁,由于套管是高电导率的金属材质,趋肤效应使得感应电流主要存在于套管内壁附近,在偏置磁场的作用下,产生的初始振动沿着套管环向传播时可在常规套管中激发准 SH 导波;

(2)数值仿真和实验测量均观测到了沿着套管环向传播的零阶和一阶准 SH 波,零阶准 SH 波频散弱,沿着套管环向传播时波形特征基本不变,一阶准 SH 波强频散,沿着套管传播时持续时间较长;

(3)在胶结良好的套管井模型中,在套管中激发的准 SH 波沿着套管传播时还会向水泥环中辐射准 SH 波,辐射到水泥环中的准 SH 波传播到水泥-地层界面时发生反射,反射的准 SH 波耦合到套管中继续沿着套管环向传播,可被接收器接收到,反射的准 SH 波的幅度和相位信息携带了水泥环第二界面的胶结状况.

Tsinghua University Press.

- Huang S L, Wang Z, Wang S, et al. 2018. Review on advances of pipe electromagnetic ultrasonic guided waves technology and its application. *Chinese Journal of Scientific Instrument* (in Chinese), 39(3): 1-12.
- Karimi F. 2020. Numerical model of magnetostriction and Lorentz force mechanisms in electromagnetic acoustic transducers [Ph. D. thesis]. Toronto: University of Toronto.
- Masahiko H, Hirotsugu O. 2017. *Electromagnetic Acoustic Transducers*. Japan: Springer Nature.
- Patterson D, Dighe S, Matuszyk P J, et al. 2016. Extending the understanding of in-situ cement properties. // Proceedings of

- the SPWLA 57th Annual Logging Symposium. Reykjavik; SPWLA.
- Ribichini R, Cegla F, Nagy P B, et al. 2011. Study and comparison of different EMAT configurations for SH wave inspection. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 58(12): 2571-2581.
- Ribichini R, Cegla F, Nagy P B, et al. 2012. Assessment of the performance of different EMAT configurations for shear horizontal and torsional waves. *AIP Conference Proceedings*, 1430(1): 955-962.
- Rose J L. 2004. *Ultrasonic Waves in Solid Media* (in Chinese). He C F, Wu B, Wang X Y Trans. Beijing: Science Press.
- Seung H M, Kim H W, Kim Y Y. 2013. Development of an omnidirectional shear-horizontal wave magnetostrictive patch transducer for plates. *Ultrasonics*, 53(7): 1304-1308.
- Tang J, Zhang C G, Zhang B X, et al. 2016. Cement bond quality evaluation based on acoustic variable density logging. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 43(3): 469-475.
- Tang X M, Bolshakov A, Wang T, et al. 2009-04-28. Method and apparatus for cement bond evaluation using transversely polarized shear waves; US, 7525872.
- Tang X M, Bolshakov A, Domangue E. 2010-08-31. Cement bond analysis; US, 7787327.
- Tang X M, Jiang C, Su Y D, et al. 2018. An acoustic-wave theory for casing bond evaluation using viscoelastic slip boundary modeling. *Science China Earth Sciences*, 61(8): 1057-1064.
- Wei T. 2010. *Logging Evaluation of Cement Bonding in Cased Boreholes* (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press.
- Wang H, Tao G, Shang X F. 2016. Understanding acoustic methods for cement bond logging. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(5): 2407-2416.
- Wu M D, Qiao W X, Wei T, et al. 2016. Review on Well Integrity Logging. *Well Logging Technology* (in Chinese), 40(1): 1-11.

附中文参考文献

- 陈雪莲, 唐晓明. 2019. 套后介质声学性质对套管中三种模式波影响的对比分析. *地球物理学报*, 62(4): 1565-1572, doi: 10.6038/cjg2019L0765.
- 陈雪莲, 唐晓明. 2020. 套管中周向传播准 SH 波的传播特征. *石油学报*, 41(7): 895-902.
- 黄松岭, 王坤, 赵伟. 2013. *电磁超声导波理论与应用*. 北京: 清华大学出版社.
- 黄松岭, 王哲, 王坤等. 2018. 管道电磁超声导波技术及其应用研究进展. *仪器仪表学报*, 39(3): 1-12.
- 罗斯 J L. 2004. *固体中的超声波*. 何存富, 吴斌, 王秀彦译. 北京: 科学出版社.
- 唐军, 章成广, 张碧星等. 2016. 基于声波-变密度测井的固井质量评价方法. *石油勘探与开发*, 43(3): 469-475.
- 唐晓明, 江灿, 苏远大等. 2018. 用黏弹滑移界面表征的固井声波测井理论. *中国科学: 地球科学*, 48(8): 1045-1052.
- 魏涛. 2010. *油气井固井质量测井评价*. 北京: 石油工业出版社.
- 吴铭德, 乔文孝, 魏涛等. 2016. 油气井封固性测井述评. *测井技术*, 40(1): 1-11.

(本文编辑 胡素芳)