

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006183

曲面构件斜入射 SV 波 EMAT 辐射声场特性分析*

唐 琴¹, 石文泽^{1,2}, 卢 超^{1,3}, 石 峰¹, 陈 尧¹

(1. 南昌航空大学 无损检测教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 中科院声学研究所
声场声信息国家重点实验室 北京 100190; 3. 赣南师范大学物理与电子信息学院 赣州 341000)

摘 要:为了解决曲面构件的凹凸检测面的曲率半径对斜入射垂直剪切波(SV波)电磁超声换能器(EMAT)的缺陷检测分辨率/灵敏度和定位/定量偏差影响这一问题,建立了基于圆弧曲面(凹面和凸面)检测面的斜入射SV波EMAT辐射声场有限元模型,研究了曲折线圈匝数、弧面曲率对斜入射SV波的主瓣峰值、主瓣宽度、主旁瓣比和入射角的影响,并对仿真结果进行实验验证。结果表明,当曲折线圈匝数相同时,凸面检测面的SV波幅值相比于平面检测面提高34.8%以上,主瓣宽度减小43.8%;当曲折线圈匝数由10匝增至30匝时,凸面检测面的SV波幅值提高42.3%,主瓣宽度减小43.6%;凸面检测面的SV波声场特性均优于平面和凹面;曲面曲率半径对斜入射SV波主瓣峰值、主瓣宽度和主旁瓣比有显著影响。

关键词: 曲面构件; 圆弧检测面; 电磁超声换能器; 斜入射SV波; 辐射声场

中图分类号: TH878 TB552 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Analysis on the radiated sound field characteristics of angled SV wave EMATs operated on a curved surface component

Tang Qin¹, Shi Wenzhe^{1,2}, Lu Chao^{1,3}, Shi Feng¹, Chen Yao¹

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Nanchang Hangkong University, Ministry of Education, Nanchang 330063, China;

2. State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. School of Physics & Electronic Information Engineering, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the curvature radius of the concave and convex testing surfaces of a curved surface component influences the resolution/sensitivity and positioning/quantitative deviation of the fault detection of an angled shear-vertical (SV) wave electromagnetic acoustic transducer (EMAT), a finite element model for the radiated sound field of an angled SV wave EMAT based on curved testing surfaces (concave and convex surfaces) is established. The influences of the number of the turns of the meander-line coil and the curvature radius on the main lobe peak, main lobe width, main-to-side-lobe ratio and incident angle of angled SV wave are investigated, and the simulated results are verified by experiments. The results show that when the numbers of the turns of the meander-line coil are the same, the SV wave amplitude of the convex testing surface is improved by more than 34.8% and the main lobe width is reduced by 43.8% compared with those of the plane testing surface. When the number of the turns of the meander-line coil increases from 10 to 30, the SV wave amplitude of the convex testing surface is improved by 42.3% and the main lobe width is reduced by 43.6%. The sound field characteristic of the convex testing surface is better than those of the plane and concave testing surfaces. The curvature radius of the convex testing surface has a significant influence on the main lobe peak, main lobe width and the main-to-side-lobe ratio of angled SV wave.

Keywords: curved surface component; curved testing surface; electromagnetic acoustic transducer; angled SV wave; radiated sound field

收稿日期: 2020-03-18 Received Date: 2020-03-18

* 基金项目: 国家自然科学基金(51705231, 51705232)、江西省自然科学基金(20192ACBL20052)、江西省科技厅科技计划项目(20192BCD40028)、南昌航空大学研究生创新专项资金(YC2019045)、江西省青年科学基金(20181BAB216020)、声场声信息国家重点实验室开放课题(SKLA201912)、江西省教育厅科技项目(GJJ170613)资助

0 引 言

厚壁管道广泛应用于石化、核电、武器装备等领域,长时间高温高压等恶劣工作环境导致管道容易出现裂纹、腐蚀等缺陷^[1-3]。随着工作时间的累积,裂纹在管道内部交变应力的作用下会慢慢扩展,严重时将造成运输材料泄露,管道爆炸等安全事故^[4-5]。因此,采用电磁超声无损检测技术对管道缺陷实现原位检测具有重要的工程应用价值。

电磁超声换能器 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT) 通过电磁耦合方式在金属材料内部激励和接收超声波。EMAT 由于其无需耦合剂、非接触、检测表面要求不高等特点,已经广泛应用于工件测厚、高温铸锻件探伤等在线、快速、非接触检测场合^[6-7]。采用不同类型的线圈搭配不同组合形式的永磁体或电磁铁,可激励不同类型的超声波^[8-9]。此外,传统压电探头需要频繁更换楔块才能产生不同入射角度的超声波,以及满足与不同曲率的检测面贴合要求,而曲折线圈 EMAT 通过改变激励电流的频率,即可获得不同入射方向的超声波^[10]。采用柔性 PCB 线圈,便可实现与曲面检测面自适应贴合^[11]。

国内外学者在平面检测面斜入射横波 EMAT 原理研究和应用方面已经进行了比较深入的研究。Ogi 等^[12-13]发现等间距曲折线圈 EMAT 能够在试样内部产生声束偏转的 SV 波 (shear-vertical wave, SV wave, 垂直剪切波), 总结出曲折线圈相邻导线间距与斜入射 SV 波偏转角度的函数关系式,并给出斜入射 SV 波的最佳偏转角度范围;利用不等间距曲折线圈 EMAT 激励出线聚焦斜入射 SV 波,在激励频率为 4 MHz 时检测出深度为 0.05 mm 的裂纹。Wang 等^[14]和 Chen 等^[15]在 Ogi 研究的基础上进行改进,通过对 2 个不等间距的曲折线圈通以相位相差 90°的正弦脉冲电流,实现了斜入射 SV 波的单向线聚焦功能,并通过实验验证;改进后的曲折线圈 EMAT 的回波幅值比传统斜入射 SV 波 EMAT 提高了 10%。Takishita 等^[16]采用单个永磁体搭配圆弧曲折线圈在 20 mm 厚度的钢板中激励出点聚焦 SV 波,并在钢板下表面检测出深度为 0.05 mm 的切槽。Nakamura 等^[17]分析了 1.1~3.0 MHz 频率下点聚焦 SV 波 EMAT 对不锈钢材料缺陷的检测能力和空间分辨率,发现当激励频率为 2 MHz 时,能够清楚地检测出焊缝附近深度为 0.5 mm 的裂纹。Jia 等^[18]分析了圆弧曲折线圈的圆心角和聚焦深度对点聚焦 SV 波 EMAT 聚焦性能的影响,发现圆弧曲折线圈的圆心角越小,SV 波幅值越低,焦点位置偏移越严重,提离距离越小,圆心角对 SV 波幅值的影响效果越显著。Hill 等^[10, 19]采用周期永磁体序列搭配跑道线圈激励出 SH 体波,通过改变激励频率,获得不同入射角度、不同主瓣宽

度的斜入射 SH 体波的声场特性,发现窄带脉冲信号能激励出沿特定角度分布的斜入射 SH 体波,而宽带脉冲信号能激励出沿一定角度范围分布的斜入射 SH 体波,并使用上述 2 种方法对试样中的裂纹进行二维成像。

在 EMAT 辐射声场研究方面,陈秋颖等^[20]根据电磁超声辐射声场机理,建立了 EMAT 的力源数学模型和半无限大弹性介质中声场位移的解析模型,得到了横波、纵波的法向和切向指向性图,并通过实验验证。Xie 等^[21]采用分布式点源算法建立了表面波 EMAT 数学模型,通过实验验证了该算法的正确性,并分析了铝板中表面波的声场辐射特性,结果表明,曲折线圈长度越长,表面波 EMAT 的主瓣越窄,超声波能量越集中。高松巍等^[22]通过对曲折线圈 EMAT 进行数值计算,发现在一定条件下,被测试件中涡流密度随曲折线圈的长度、宽度及提离距离的增大而减小,表面波 EMAT 的声场强度随表面波辐射半张角的增加而迅速衰减,确定实际探伤中激励与接收线圈的安装角度不应超过辐射半张角,为检测过程中 EMAT 探头位置选择给出了理论支撑。

综上所述,国内外关于平面检测面的 EMAT 辐射声场特性分析和实验研究较为深入,但是关于曲面检测面的 EMAT 声场分析和实验研究较少,并且研究者们重点关注 EMAT 参数对声场束向性的影响,很少涉及曲面曲率半径和 EMAT 设计参数对超声波的主瓣峰值、主瓣宽度和主旁瓣比的影响^[23-26]。值得关注的是,当被测试样的检测面为圆弧曲面时,以厚壁管道为例,内壁检测为凹面、外壁检测为凸面,圆弧曲率半径对曲折线圈 EMAT 辐射声场的主瓣宽度、主瓣峰值以及主旁瓣比均有影响,同时 EMAT 设计参数对圆弧检测面的辐射声场特性的影响也不可忽略,从而导致曲面构件中的缺陷检测和定位/定量精度出现偏差。

本文通过建立不同曲率半径的凹凸面和平面 3 种检测面的斜入射 SV 波 EMAT 辐射声场有限元模型,分析了凹凸面曲率半径和线圈匝数对斜入射 SV 波 EMAT 的主瓣宽度、主瓣峰值、主旁瓣比和入射角的影响,并进行实验验证。

1 EMAT 换能机理及控制方程

EMAT 探头主要由永磁体或电磁铁、线圈和待测金属试样组成。在非铁磁性材料中,洛伦兹力占主导作用,在铁磁性材料中,除了洛伦兹力,还存在磁致伸缩力^[27]。本文主要研究基于洛伦兹力换能机理的斜入射 SV 波 EMAT,其探头配置形式如图 1 所示。

基于洛伦兹力机理的斜入射 SV 波 EMAT 换能机理如图 2 所示。当曲折线圈中通以高频大功率脉冲电流时,试样近表面会产生频率相同、相位相反的电涡流 J_e ,

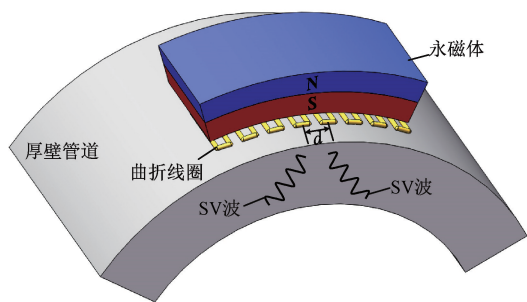


图1 曲折线圈 EMAT 配置形式

Fig.1 Configuration of a meander-line coil EMAT

涡流与静态偏置磁场 B_r 和交变磁场 B_d 共同作用下形成洛伦兹力 f_L , 其表达式如下^[28]:

$$f_L = J_e \times (B_r + B_d) \quad (1)$$

洛伦兹力带动质点振动,在试样内部产生斜入射纵波、斜入射 SV 波和表面波。斜入射 SV 波的入射角 θ 与曲折线圈的匝间距 d 满足如下关系^[12]:

$$\sin\theta = \frac{c}{2fd} \quad (2)$$

式中: c 表示 SV 波在试样中的声速; f 为激励频率。

超声波在试样内部传播过程的控制方程如下^[29]:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \mathbf{T} = \mathbf{f}_L \quad (3)$$

式中: ρ 表示材料密度; $\mathbf{u}$ 为位移矢量; $\mathbf{T}$ 表示弹性应力张量。

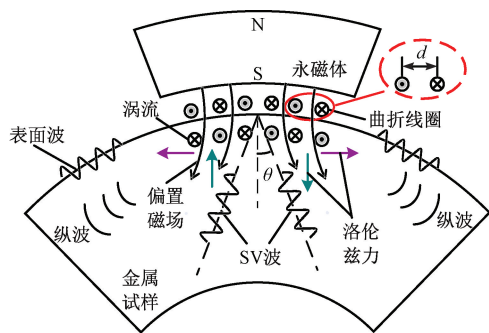


图2 斜入射 SV 波 EMAT 换能机理

Fig.2 Transduction mechanism of an angled SV wave EMAT

2 曲面斜入射 SV 波有限元模型

基于曲面检测面的斜入射 SV 波 EMAT 辐射声场有限元模型如图3所示。EMAT 中心点 O 到接收半圆距离为 100 mm。 R 表示曲面检测面的曲率半径,试块的杨氏模量为 2×10^{11} Pa,密度为 7850 kg/m^3 ,泊松比为 0.3。有限元模型采用最大网格尺寸为 0.156 mm 的三角形单元网格,网格大小满足 $\lambda/10$ (λ 为超声波的波长),计算结

果收敛。将曲折线圈 EMAT 在试样表面形成的洛伦兹力简化为正负相间的、中心间距为 d 、沿圆弧检测面切向方向的线力 F_L 和 $-F_L$,数学表达式为:

$$\mathbf{F}_L = \begin{cases} F_0 \cos(\omega t) [1 - \cos(\omega t/n)]/2, & 0 \leq t \leq (2n\pi)/\omega \\ 0, & t \geq (2n\pi)/\omega \end{cases} \quad (4)$$

式中:力源幅值 $F_0 = 1 \text{ N}$; $\omega = 2\pi f$; 频率 $f = 2 \text{ MHz}$; n 为正弦信号的脉冲个数。

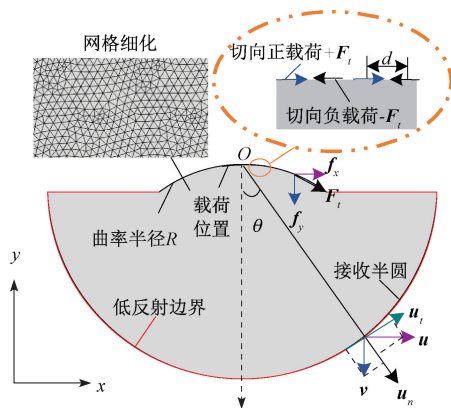


图3 曲面构件斜入射 SV 波有限元模型

Fig.3 Finite element model of an angled SV wave for the curved surface component

由于检测面为曲面,代表洛伦兹力的力源 F_L 可按矢量分解为水平分量 f_x 和垂直分量 f_y 。同理,取超声波的切向位移分量 u_t 作为 SV 波,法向位移分量 u_n 作为纵波,其计算表达式如下^[20]:

$$\begin{cases} u_t = u \cdot \cos\theta - v \cdot \sin\theta \\ u_n = u \cdot \sin\theta + v \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (5)$$

当曲折线圈 EMAT 激励频率为 2 MHz,得到超声波辐射声场云图如图4所示。由图4(a)和(b)可知,SV 波和纵波的主瓣按一定角度对称分布,旁瓣分布在主瓣之间,且 SV 波能量远大于纵波,纵波的入射角大于 SV 波。

对超声波切向位移分量(SV 波)幅值进行归一化处理,得到如图5所示的斜入射 SV 波指向性图。由图5可知,当曲折线圈匝间距为 1.565 mm、激励频率为 2 MHz 时,斜入射 SV 波 EMAT 的两个主瓣对称分布在 -30° 和 30° 附近。采用主瓣峰值-6 dB 法计算主瓣宽度,将主瓣峰值与幅值最高的旁瓣比值记为主旁瓣比,由于旁瓣的存在,波形杂乱,导致缺陷检测灵敏度下降。因此,主旁瓣比也是评价曲折线圈 EMAT 检测能力的重要指标。

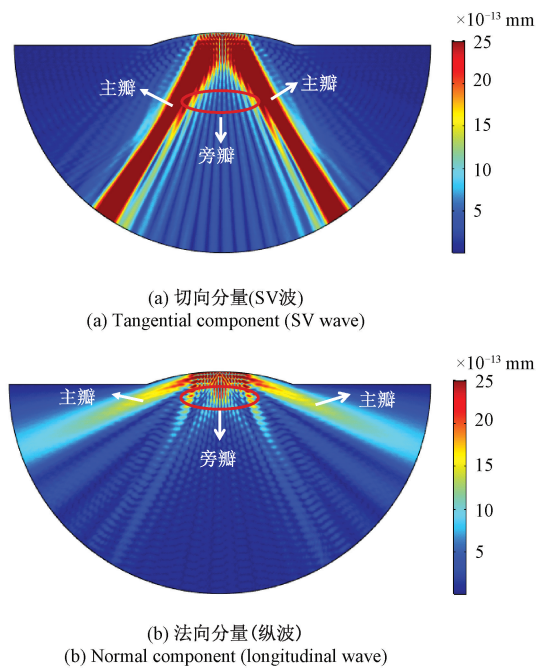


图 4 曲折线圈 EMAT 超声波辐射云图
Fig.4 Radiation contours of the ultrasonic waves from a meander-line coil EMAT

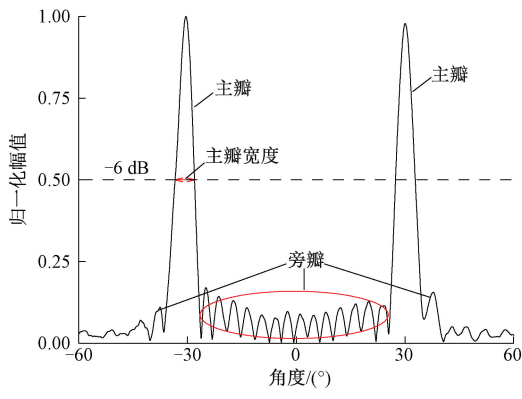


图 5 斜入射 SV 波指向性曲线
Fig.5 Directivity diagram of an angled SV wave

3 实验验证

斜入射 SV 波 EMAT 的辐射声场测试实验系统如图 6 所示。信号发生器产生频率为 2 MHz,持续时间 5 μ s 的正弦脉冲串信号输入至功率放大器,激励端阻抗匹配保证曲折线圈 EMAT 从功率放大器中获得尽可能多的能量。

半圆形试块材料为 45#钢。使用柔性 PCB 曲折线圈搭配方形永磁体,保证 EMAT 探头与试样曲面较好贴合。曲折线圈几何参数如图 7 所示,采用 4 根分裂曲折线圈,

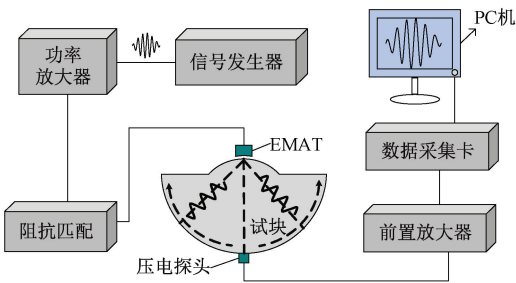


图 6 斜入射 SV 波声场测试系统
Fig.6 Block diagram of the sound field testing system for angled SV wave

线圈长度 $l=55$ mm,单根导线宽度 $b=0.15$ mm,相邻导线间距 $a=0.3$ mm,匝间距 $d=1.565$ mm,导线高度 $c=1$ 盎司,匝数为 10~30 匝。采用薄铜片屏蔽部分导线,可获得不同匝数的曲折线圈。永磁体尺寸为:长 40 mm $\times$ 宽 40 mm $\times$ 高 5 mm。采用频率为 10 MHz 的 $\Phi 4$ mm 横波压电探头 (Olympus V157) 和频率为 5 MHz 的 $\Phi 6$ mm 纵波压电探头沿试块的外圆弧面分别采集 SV 波和纵波,将采集所得的信号输入前置放大器,经过数据采集卡,最后在安装有 LabVIEW 软件界面的 PC 机上实现超声波信号的显示和存储。

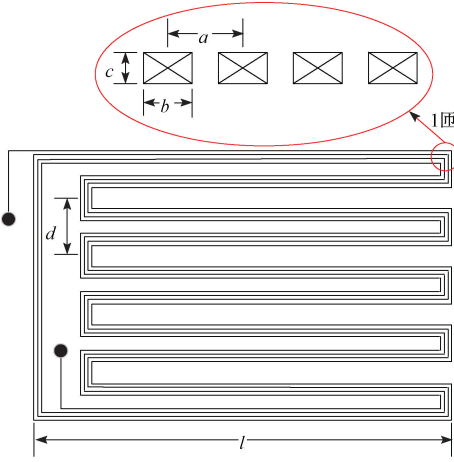


图 7 曲折线圈几何参数结构
Fig.7 Schematic diagram of the geometric parameters of a meander-line coil

辐射声场测点布置如图 8(a) 所示,半圆形试块实物如图 8(b) 所示。横波/纵波压电探头沿着以 EMAT 探头中心 O 点为圆心、半径为 100 mm 的半圆弧面上进行扫查,以 5 $^\circ$ 为步长,扫查角度范围 $\alpha_1 \sim \alpha_2$ 为 $-80^\circ \sim 80^\circ$ 。

图 9(a) 所示为 30 $^\circ$ 入射角时,采用横波压电探头接收到的 A 扫信号;图 9(b) 所示为 62 $^\circ$ 时,采用纵波压电探头接收到的 A 扫信号。由图 9 可知,曲折线圈 EMAT 在产生斜入射 SV 波的同时,还会产生纵波以及表面波。

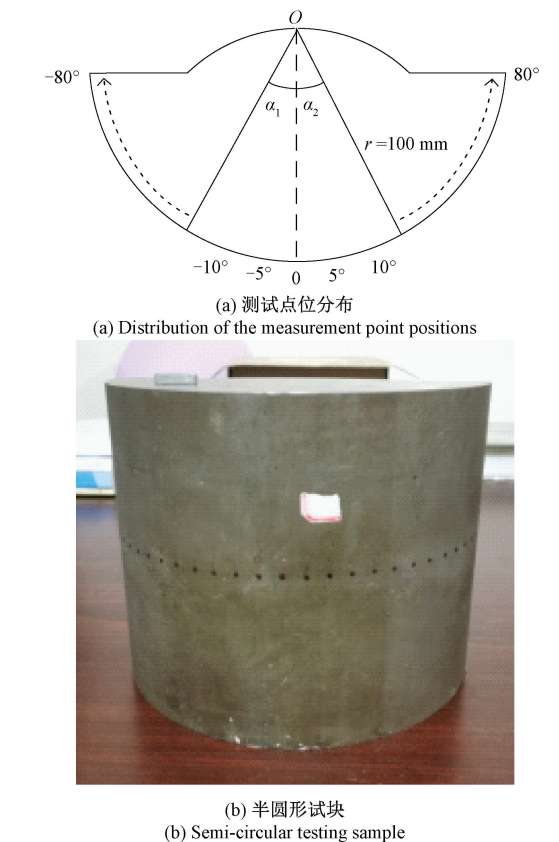


图 8 测点分布和半圆形试块实物

Fig.8 Distribution of the measurement point positions and the picture of the semi-circular test sample

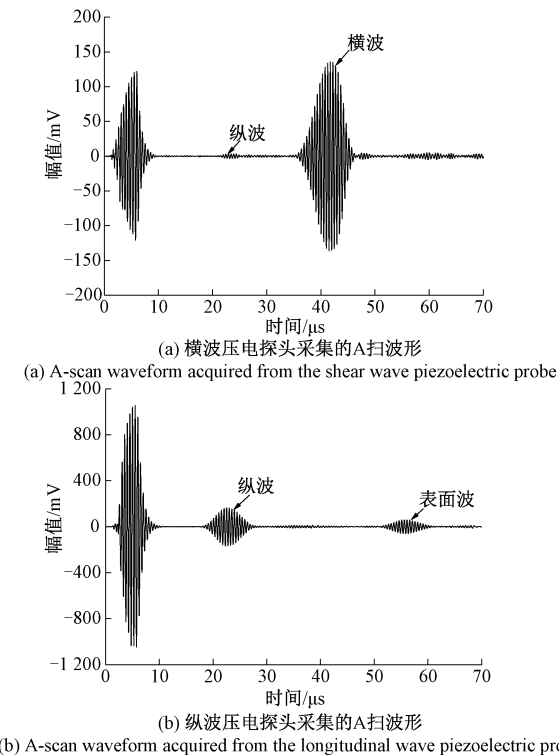


图 9 不同测试点位的超声波

Fig.9 Ultrasonic wave signals from different measurement points

曲折线圈匝数为 10 匝时,凸面检测面的斜入射 SV 波和纵波声场的仿真与实验结果如图 10 所示。由图 10 可知,基于凸面检测面的曲折线圈 EMAT 能够产生沿一定方向分布的斜入射 SV 波和纵波。图 10 中仿真与实验存在一定误差,这是因为仿真数据来自于接收半圆有限元网格单元点的值,而实验数据是接收探头与试块接触区域的位移平均值,并且接收探头晶片具有一定面积,导致实验结果与理论值存在一定误差,但总体趋势是一致的,表明有限元计算结果基本准确。

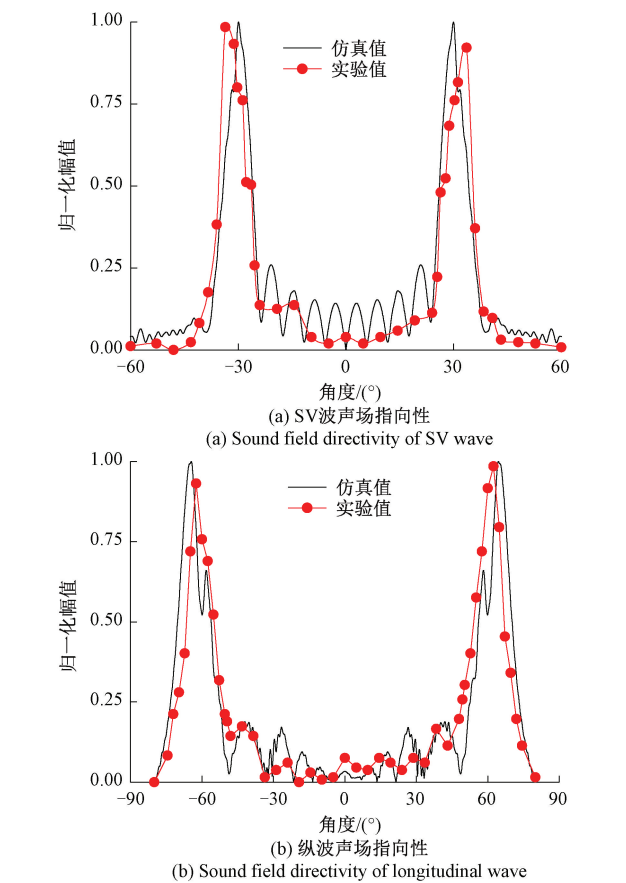


图 10 曲折线圈 EMAT 声场的仿真与实验结果

Fig.10 Simulation and experiment results of the sound field for a meander-line coil EMAT

4 圆弧曲率对斜入射 SV 波辐射声场的影响

4.1 凸面曲率半径对 SV 波主瓣宽度和主瓣峰值的影响

当曲折线圈匝数为 20 匝,检测面为凸面时,不同曲率半径的凸面 SV 波声场云图如图 11 所示。由图 11 可知,凸面曲率半径越大,SV 波主瓣宽度越窄,超声波能量越集中。曲率半径较小导致 SV 波在接收半圆弧处能量发散,主瓣变宽,聚焦点变近,不利于提高较远处缺陷的检测能力。

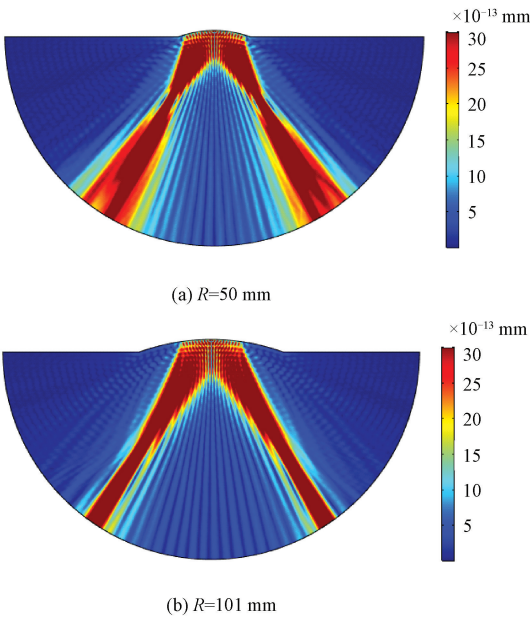
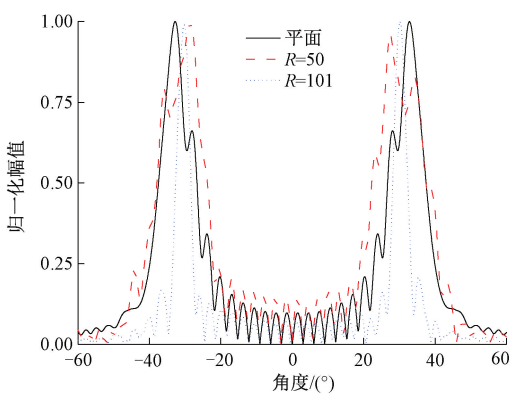


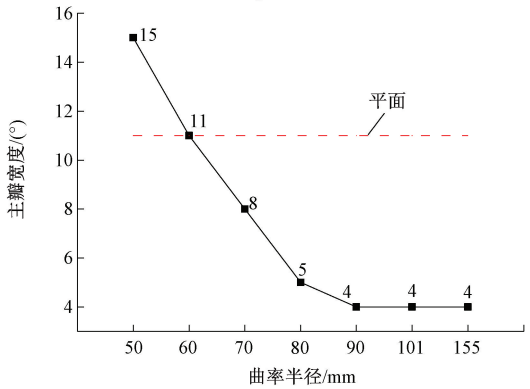
图 11 凸面 SV 波声场云图

Fig.11 Contours of SV wave sound field for the convex surface

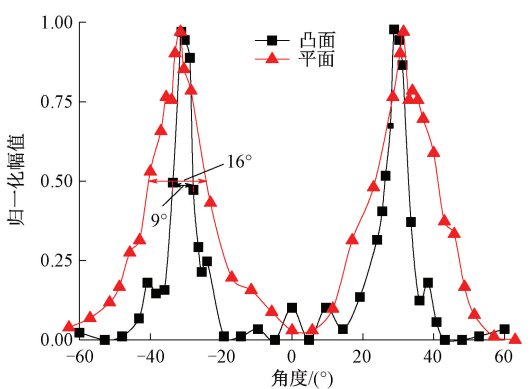
凸面检测面的曲率半径对 SV 波主瓣宽度的影响如图 12 所示。



(a) Directivity simulation results of the SV waves for convex and plane surfaces



(b) Main lobe width simulation results of the SV waves for convex surface



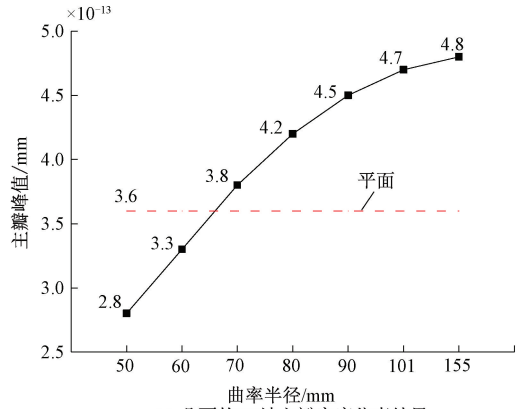
(c) SV wave directivity experiment results for $R=101\text{ mm}$ convex and plane surfaces

图 12 凸面曲率半径对 SV 波主瓣宽度的影响

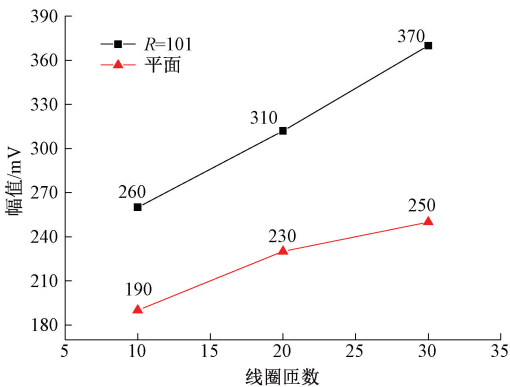
Fig.12 Influence of the curvature radius of convex surface on the main lobe width of SV wave

由图 12(a) 可知,SV 波主瓣宽度随曲率半径的增大而减小;由图 12(b) 可知,当曲率半径由 50 mm 增至 90 mm 时,SV 波主瓣宽度减小了 11°;当曲率半径大于 90 mm 时,SV 波主瓣宽度基本保持不变。当曲率半径大于 60 mm 时,凸面检测面的主瓣宽度均小于平面检测面。图 12(c) 所示为 $R=101\text{ mm}$ 的凸面和平面检测面的 SV 波声场指向性实验结果,由图 12(c) 可知,凸面检测面的主瓣宽度比平面检测面减小了 43.8%。

凸面检测面曲的曲率半径对斜入射 SV 波主瓣峰值的影响如图 13 所示。由图 13(a) 可知,SV 波主瓣峰值随曲率半径的增大而增加,当曲率半径由 50 mm 增至 155 mm 时,SV 波主瓣峰值提高了 71.4%,随着曲率半径的增大,主瓣峰值的增加幅度逐渐变缓。当曲率半径大于 70 mm 时,凸面检测面的主瓣峰值均高于平面。由图 13(b) 的实验结果可知,当曲折线圈匝数为 10、20 和 30 匝时,凸面检测面对应的 SV 波幅值比平面分别提高了 36.8%、34.8% 和 48%。相同匝数下,凸面检测面曲折线圈 EMAT 激励的 SV 波幅值均高于平面检测面。



(a) Main lobe width simulation results of the SV waves for convex surface



(b) $R=101$ mm 凸面与平面的 SV 波实验结果
(b) Experiment result of SV wave for $R=101$ mm convex and plane surfaces

图 13 凸面曲率半径对 SV 波主瓣峰值的影响
Fig.13 Influence of the curvature radius of convex surface on the main lobe peak of SV wave

4.2 凹面曲率半径对 SV 波主瓣宽度及主瓣峰值的影响

曲折线圈匝数为 20 匝,检测面为凹面时,不同曲率半径对应的 SV 波云图如图 14 所示。由图 14 可知,SV 波主瓣宽度随凹面曲率半径的增大而减小,凹面曲率半径越小,SV 波能量发散越严重。

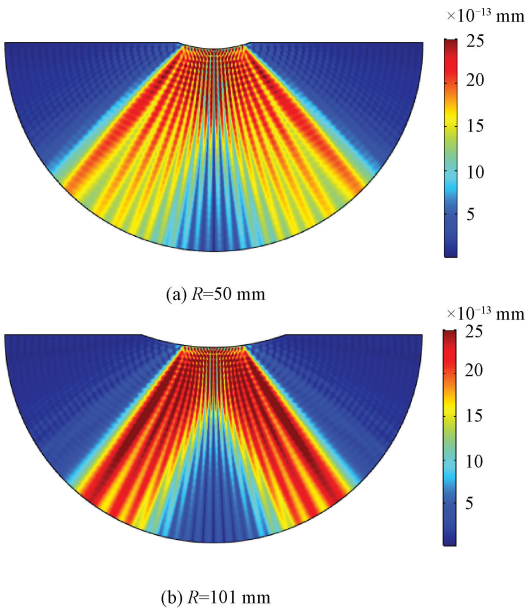
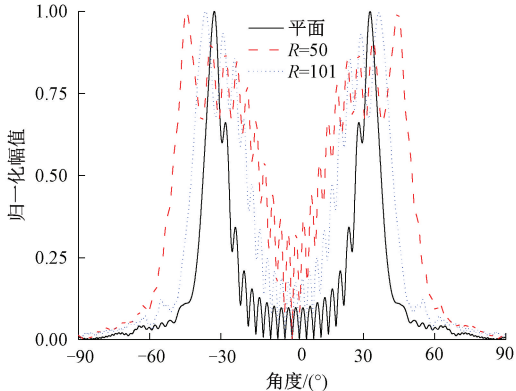


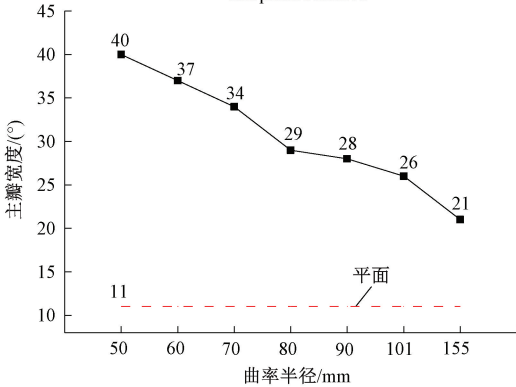
图 14 凹面 SV 波声场云图
Fig.14 Contours of SV wave sound field for the concave surface

不同曲率半径凹面检测面对 SV 波主瓣宽度和主瓣峰值影响如图 15 所示。由图 15(a)和(b)可知,SV 波的主瓣宽度随曲率半径的增大而减小,当曲率半径由 50 mm 增至 155 mm 时,SV 波主瓣宽度减小了 19°,但均

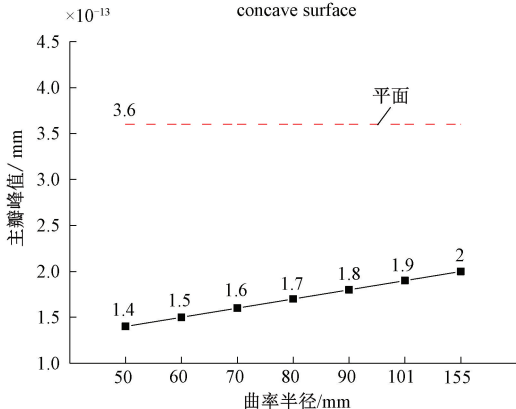
大于平面检测面的主瓣宽度。由图 15(c)可知,当凹面曲率半径由 50 mm 增至 155 mm 时,SV 波主瓣峰值仅增加了 42.9%,且均小于平面检测面的主瓣峰值。



(a) 凹面与平面的 SV 波指向性仿真结果
(a) Directivity simulation results of the SV wave for concave and plane surfaces



(b) 凹面的 SV 波主瓣宽度仿真结果
(b) Main lobe width simulation results of the SV wave for the concave surface



(c) 凹面的 SV 波主瓣峰值仿真结果
(c) Main lobe peak simulation result of the SV wave for the concave surface

图 15 凹面曲率半径对 SV 波主瓣宽度和主瓣峰值的影响
Fig.15 Influence of the curvature radius of the concave surface on the main lobe width and peak of SV wave

4.3 曲率半径对 SV 波入射角和主旁瓣比的影响

取主声束与 EMAT 中心线的夹角为入射角 θ ,如图 16 所示。当曲折线圈匝数为 20 匝,不同曲率半径凸

面与凹面检测面的 SV 波声场特性参数如表 1 所示。由表 1 可知,当曲率半径由 50 mm 增至 155 mm 时,凹面和凸面检测面的 SV 波入射角保持在 30°左右。当曲率半径由 50 mm 增至 70 mm 时,凸面检测面的 SV 波主瓣宽度显著降低,主旁瓣比提高 85.2%。当凸面曲率半径大于 70 mm 时,曲率半径对 SV 波主瓣宽度和主旁瓣比影响作用有限。相同曲率半径时,凸面的主旁瓣比大于凹面。曲率半径对凹面检测面的 SV 波主旁瓣比的影响较小,保持在 1.1 左右。凹面和凸面的 SV 波主瓣宽度均随着曲率半径增大而减小,但凹面的主瓣宽度均大于凸面。

表 1 不同圆弧面的斜入射 SV 波声场参数

Table 1 Sound field parameters of angled SV wave for different curved surfaces								
曲率半径 /mm	凸面入射 角度 $\theta/(^{\circ})$	凸面主瓣 宽度/ $(^{\circ})$	凸面主瓣峰 值/ 10^{-13} mm	凸面主旁 瓣比	凹面入射角度 $\theta/(^{\circ})$	凹面主瓣 宽度/ $(^{\circ})$	凸面主瓣 峰值/ 10^{-13} mm	凹面主旁 瓣比
50	31.2	15	2.8	3.1	29.5	40	1.4	1.10
60	30.3	11	3.3	2.7	30.3	37	1.5	1.07
70	30.4	8	3.8	5.0	30.1	34	1.6	1.05
80	30.3	5	4.2	4.5	30.8	29	1.7	1.05
90	30.0	4	4.5	4.3	30.2	28	1.8	1.10
101	30.1	4	4.7	4.8	29.7	27	1.9	1.10
155	30.0	4	4.8	4.6	29.5	21	2.0	1.10

对于凸面检测面而言,曲率半径在一定范围内增加会显著提高 SV 波的主瓣峰值,SV 波能量更多的聚集于主瓣中,主旁瓣比值显著提高,主瓣宽度减小;对于凹面检测面而言,SV 波主瓣宽度随曲率半径的增大而减小,但是其主瓣峰值增幅较小,因此曲率半径增大无法提高 SV 波的主旁瓣比值。

5 线圈匝数对斜入射 SV 波声压分布的影响

5.1 线圈匝数对平面检测面 SV 波辐射声场的影响

图 17 所示为平面检测面时,不同线圈匝数对应的 SV 波声场指向性的仿真与实验结果。由图 17(a)~(c)可知,当曲折线圈匝数由 10 匝增至 30 匝时,主瓣宽度增加了 92.2%。线圈匝数过多导致 SV 波主瓣宽度增加,超声波能量发散,不利于提高缺陷检测分辨率。

平面检测面时,不同线圈匝数对应的 SV 波主瓣宽度如图 18 所示。由图 18 可知,随着线圈匝数的增加,SV 波主瓣宽度呈现先下降后上升的趋势,在 16 匝时取得最小值。当曲折线圈匝数由 16 匝增至 30 匝,SV 波主瓣宽度增加了 10°。因此,对于平面检测面而言,线圈匝数过多不利于提高 SV 波的检测分辨率。

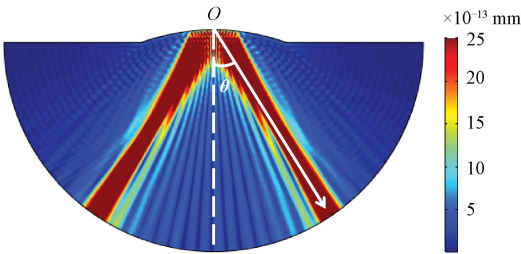
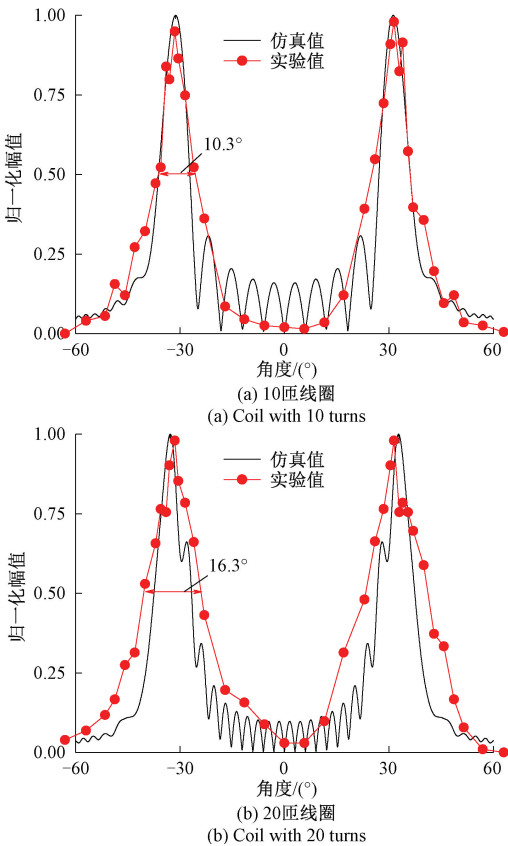


图 16 斜入射 SV 波入射角度
Fig.16 The incident angle diagram of angled SV wave



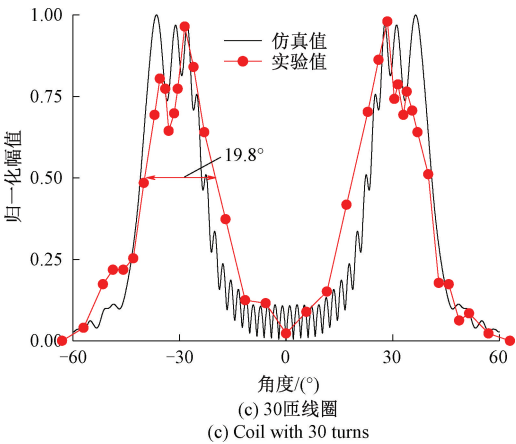


图 17 平面不同线圈匝数时 SV 波指向性实验结果
Fig.17 Experiment results of SV wave directivity for the plane surface with different number of turns of the coil

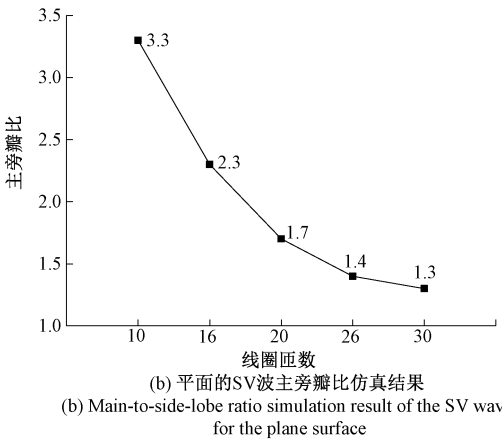


图 19 线圈匝数对平面 SV 波主瓣峰值和主旁瓣比的影响
Fig.19 Influence of number of turns on the main lobe peak and main-to-side-lobe ratio of the SV wave for plane surface

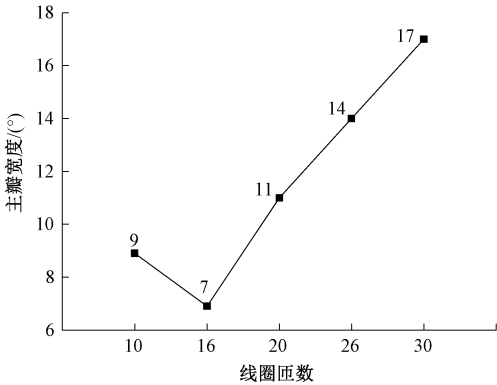
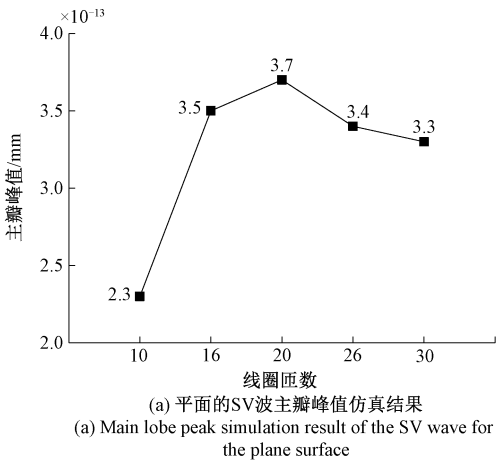


图 18 平面不同线圈匝数的 SV 波主瓣宽度仿真结果
Fig.18 Main lobe width simulation result of the SV wave for the plane surface with different number of turns of the coil

曲折线圈匝数对平面检测面 SV 波主瓣峰值和主旁瓣比的影响如图 19 所示。

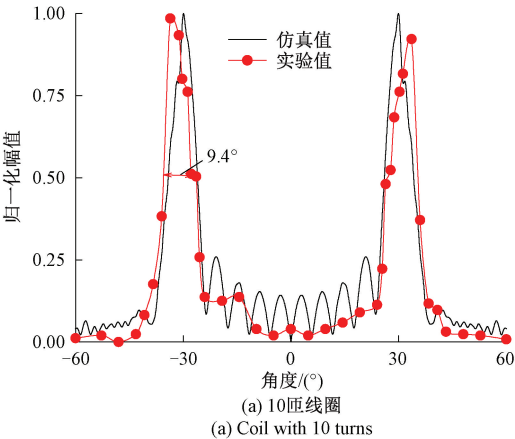


由图 19(a) 可知,随着线圈匝数增加,SV 波主瓣峰值呈现先增大后减小的趋势,在 20 匝处取得最大值。由图 19(b) 可知,SV 波主旁瓣比随曲折线圈匝数增大而降低。当曲折线圈匝数由 10 匝增至 30 匝时,主旁瓣比降低了 60.6%。曲折线圈匝数过多不能有效抑制旁瓣幅值,还不利于提高 SV 波的主瓣峰值。

5.2 线圈匝数对凸面检测面的 SV 波辐射声场的影响

图 20 所示为凸面检测面时,不同线圈匝数对应的 SV 波指向性的仿真与实验结果。由图 20(a)~(c) 可知,SV 波主瓣宽度随曲折线圈匝数的增加而减小,当线圈匝数由 10 匝增至 30 匝时,SV 波主瓣宽度减小了 4.1°。当线圈匝数大于 20 匝时,增加曲折线圈匝数对 SV 波主瓣宽度影响作用有限。

凸面曲率半径为 101 mm 时,不同线圈匝数对应的 SV 波主瓣宽度如图 21 所示。由图 21 可知,当线圈匝数由 10 匝增加至 30 匝时,SV 波主瓣宽度减小了 5.8°。当线圈匝数大于 26 匝时,增加曲折线圈匝数对主瓣宽度的影响较小。对于凸面检测面,线圈匝数越多,SV 波主瓣宽度越窄,超声波能量越集中。



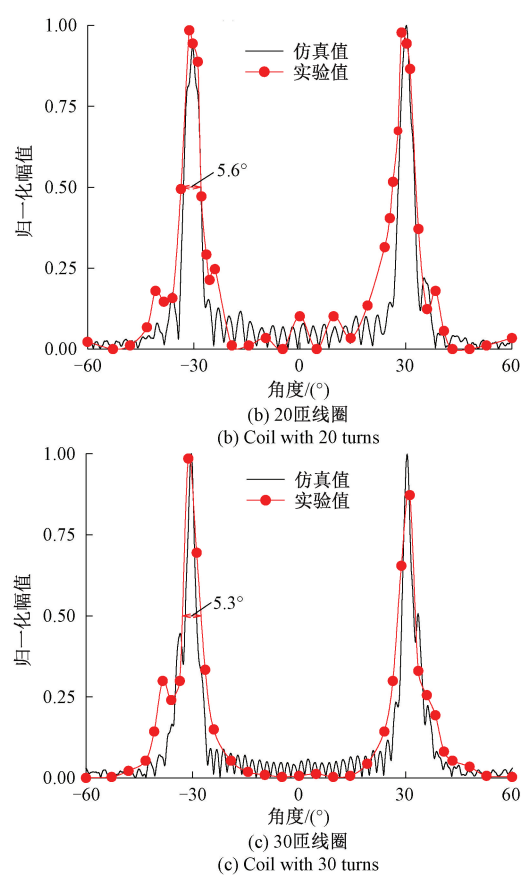


图 20 不同线圈匝数时凸面 SV 波指向性实验结果
Fig.20 Experiment results of the SV wave directivity for the convex surface with different number of turns

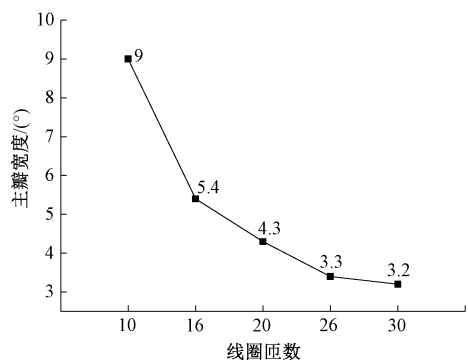
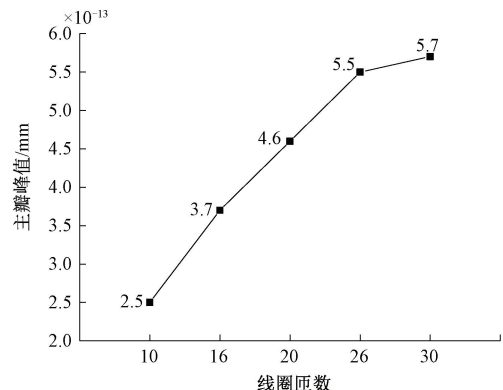


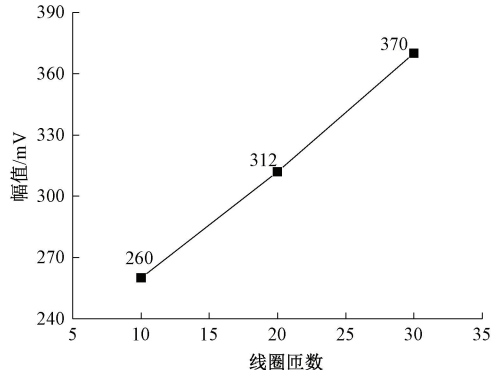
图 21 凸面不同线圈匝数的 SV 主瓣宽度仿真结果
Fig.21 Main lobe width simulation result of the SV wave for the convex surface with different number of turns

曲折线圈匝数对凸面检测面 SV 波主瓣峰值和主旁瓣比的影响如图 22 所示。由图 22 (a) 可知,曲折线圈匝数由 10 匝增至 30 匝时,SV 波的主瓣峰值增加了 128%。当线圈匝数大于 26 匝时,SV 波主瓣峰值增幅较小。图 22(b) 表示凸面曲率半径为 101 mm,不同曲折线圈匝数对应的 SV 波实验结果。由图 22 (b) 可知,曲折线圈由

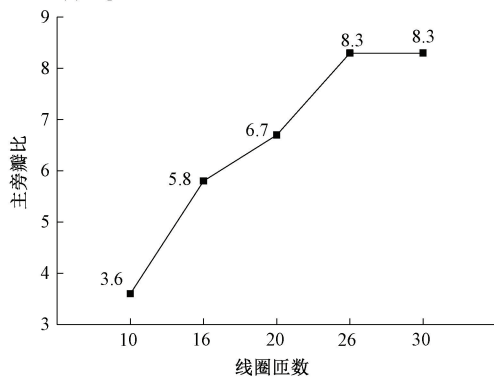
10 匝增至 30 匝时,SV 波幅值提高了 42.3%。增加线圈匝数能够显著提高斜入射 SV 波 EMAT 的换能效率。由图 22(c) 可知,曲折线圈由 10 匝增加至 30 匝时,SV 波主旁瓣比值增加了 130.6%。与图 19(b) 比较可知,凸面检测面的 SV 波主旁瓣比高于平面检测面。当匝数大于 26 匝时,曲折线圈匝数增加对旁瓣抑制作用有限。



(a) 凸面的SV波主瓣峰值仿真结果
(a) Main lobe peak simulation result of the SV wave for convex surface



(b) 凸面的SV波实验结果
(b) Experiment result of the SV wave for convex surface



(c) 凸面的SV波主旁瓣比仿真结果
(c) Main-to-side-lobe ratio simulation result of the SV wave for convex surface

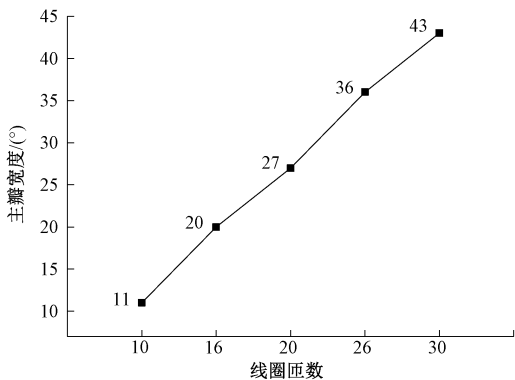
图 22 线圈匝数对凸面 SV 波主瓣峰值和主旁瓣比值的影响
Fig.22 Influence of number of turns on the main lobe peak and main-to side-lobe ratio of the SV wave for convex surface

由于凸面检测面对超声波有聚焦作用,虽然线圈匝

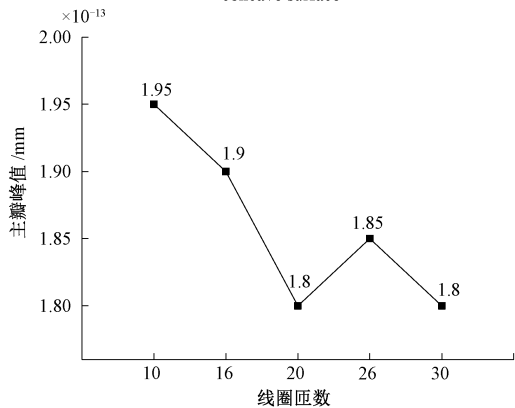
数增加会导致旁瓣数量也增加,但是其旁瓣幅值显著降低,因此一定数量的线圈匝数增加能够有效地抑制旁瓣幅值,增加 SV 波的主瓣峰值,提高主旁瓣比值,使得 SV 波能量更加聚集,主瓣宽度变窄。

5.3 线圈匝数对凹面检测面的 SV 波辐射声场的影响

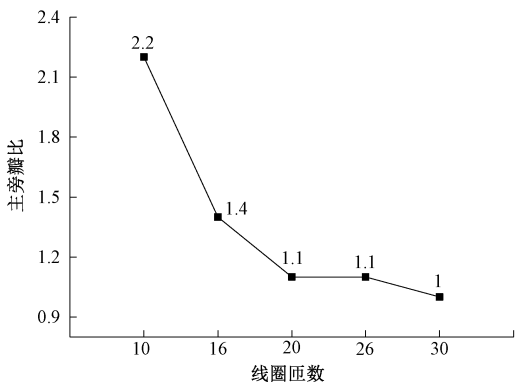
图 23 所示为当凹面曲率半径为 101 mm 时,曲折线圈匝数对凹面检测面 SV 波辐射声场的影响。



(a) 凹面的SV波主瓣宽度仿真结果
(a) Main lobe width simulation result of the SV wave for concave surface



(b) 凹面的SV波主瓣峰值仿真结果
(b) Main lobe peak simulation result of the SV wave for concave surface



(c) 凹面的SV波主旁瓣比仿真结果
(c) Main-to-side-lobe ratio simulation result of the SV wave for concave surface

图 23 线圈匝数对凹面 SV 波声场的影响

Fig.23 Influences of number of turns on the SV wave sound field for concave surface

由图 23 (a) 可知,曲折线圈匝数由 10 匝增加至 30 匝时,SV 波主瓣宽度增加了 32°。由于凹面检测面对超声波能量有发散作用,曲折线圈匝数增加,旁瓣数量也会随之增加,超声波能量散射于旁瓣之间,导致 SV 波的主瓣峰值无法随线圈匝数的增加而增强,主旁瓣比值降低,主瓣宽度变宽,超声波能量发散严重,缺陷分辨率降低。由图 23(b)可知,曲折线圈匝数对凹面检测面的主瓣峰值基本无影响,这是由于线圈匝数的增加导致声场主瓣宽度变大,超声波能量分散于主瓣宽度内,因此,线圈匝数增加并不能提高凹面检测面的 SV 波的主瓣峰值。由图 23(c)可知,SV 波主旁瓣比随曲折线圈匝数增加而下降,当曲折线圈匝数由 10 匝增加至 30 匝时,主旁瓣比降低了 54.5%。

6 结 论

本文以曲面构件的凹凸检测面为研究对象,建立了基于曲面检测面的曲折线圈斜入射 SV 波辐射声场有限元模型,分析了曲面曲率半径和线圈匝数对斜入射 SV 波 EMAT 的主瓣峰值、主瓣宽度、主旁瓣比和入射角度的影响,为厚壁管道斜入射 SV 波 EMAT 检测提供了理论支撑,主要结论如下:

1) 对于凸面检测面,曲面曲率半径和线圈匝数均会影响斜入射 SV 波的主瓣宽度、主瓣峰值和主旁瓣比。合适的线圈匝数能够显著提高 SV 波的主瓣峰值和主旁瓣比,减小主瓣宽度,提高缺陷检测的分辨力。线圈匝数过多会导致 SV 波的旁瓣数量增加,主瓣能量泄露于旁瓣之间,SV 波主瓣峰值增幅较小;另一方面,还会使得 EMAT 探头尺寸变大。因此,当检测面为凸面时,在当前的 EMAT 参数条件下,曲折线圈匝数应该保持在 16~20 匝。

2) 对于凹面检测面,曲率半径变化和曲折线圈匝数主要影响斜入射 SV 波的主瓣宽度;曲折线圈匝数增加不能提高 SV 波主瓣峰值和主旁瓣比,同时还会导致 SV 波主瓣宽度变大,超声波能量散射于旁瓣之中,降低缺陷检测分辨率。因此,当检测面为凹面时,曲折线圈匝数不宜过多。

3) 对于平面检测面而言,一定匝数的曲折线圈能够显著降低 SV 波主瓣宽度,提高主瓣峰值;但是,曲折线圈匝数过多会导致主瓣宽度变宽,主瓣能量泄露,缺陷检测灵敏度会降低。因此,当检测面为平面时,在当前的 EMAT 参数条件下,曲折线圈匝数不宜超过 16 匝。

4) 在相同曲折线圈匝数条件下,凸面检测面的 SV 波声场特性均优于凹面。因此,与凹面检测面的曲面构件相比,EMAT 探头对凸面检测面的缺陷检测分辨率更高。同时,EMAT 探头参数设计应该考虑曲率半径和线圈匝数对 SV 波的声场的影响,选择合适的探头设计参

数,提高斜入射 SV 波 EMAT 对曲面构件缺陷的检测能力。

参考文献

- [1] 黄松岭,王哲,王琬,等.管道电磁超声导波技术及其应用研究进展[J].仪器仪表学报,2018,39(3): 1-12.
HUANG S L, WANG ZH, WANG S, et al. Review on advances of pipe electromagnetic ultrasonic guided waves technology and its application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3): 1-12.
- [2] 刘增华,谢穆文,钟栩文,等.超声导波电磁声换能器的研究进展[J].北京工业大学学报,2017,43(2): 192-202.
LIU Z H, XIE M W, ZHONG X W, et al. Research progress of electromagnetic acoustic transducers for ultrasonic guided waves inspection[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(2): 192-202.
- [3] TU J, KANG Y H, LIU Y Y. A new magnetic configuration for an active electromagnetic acoustic transducer applied to online steel pipe wall thickness measurements[J]. Materials Evaluation, 2014, 72(11): 1407-1413.
- [4] 杨理践,邢燕好,张佳,等.电磁超声导波在管道中螺旋向传播的机理研究[J].仪器仪表学报,2018,39(11): 60-69.
YANG L J, XING Y H, ZHANG J, et al. Research on spiral propagation mechanism of electromagnetic ultrasonic guided wave in pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 60-69.
- [5] SALZBURGER H J, NIESE F, DOBMANN G. EMAT pipe inspection with guided waves[J]. Welding in the World, 2012, 56(5-6): 35-43.
- [6] 孙斐然,丁雨林,孙振国,等.基于缓冲波导的 $T(0,1)$ 模态导波激励方法实验研究[J].清华大学学报(自然科学版),2018,58(8): 740-745.
SUN F R, DING Y L, SUN ZH G, et al. Experimental study of the $T(0,1)$ -wave excitation method based on a buffer waveguide[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58(8): 740-745.
- [7] 石文泽,陈巍巍,陈尧,等.基于脉冲压缩技术的高温连铸坯壳厚度测量 EMAT 设计及应用[J].仪器仪表学报,2019,40(8): 119-130.
SHI W Z, CHEN W W, CHEN Y, et al. Design and application of an EMAT for solidification shell thickness detection in continuous casting slab based on the pulse compression technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8): 119-130.
- [8] RUETER D, MORGENSEN T. Ultrasound generation with high power and coil only EMAT concepts[J]. Ultrasonics, 2014, 54(8): 2141-2150.
- [9] DHAYALAN R, BALASUBRAMANIAM K. A hybrid finite element model for simulation of electromagnetic acoustic transducer (EMAT) based plate waves[J]. NDT & E International, 2010, 43(6): 519-526.
- [10] HILL S, DIXON S. Frequency dependent directivity of periodic permanent magnet electromagnetic acoustic transducers[J]. NDT & E International, 2014, 62: 137-143.
- [11] 何存富,胡跃刚,焦敬品,等.低阶扭转模态电磁声阵列传感器研制及其在厚壁小径管中的试验研究[J].机械工程学报,2015,51(2): 14-20.
HE C F, HU Y G, JIAO J P, et al. Array of fundamental torsional mode EMATs and experiment in Thick-wall pipe with small diameter[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(2): 14-20.
- [12] OGI H, HIRAO M, OHTANI T. Line-focusing of ultrasonic SV wave by electromagnetic acoustic transducer[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 103(5): 2411-2415.
- [13] OGI H, HIRAO M, OHTANI T. Line-focusing electromagnetic acoustic transducers for the detection of slit defects[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1999, 46(2): 341-346.
- [14] WANG SH J, SU R L, CHEN X Y, et al. Numerical and experimental analysis of unidirectional meander-line coil electromagnetic acoustic transducers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2013, 60(12): 2657-2664.
- [15] CHEN X Y, SU R L, ZHANG H, et al. Influence of coil parameters on transduction performance of unidirectional EMATs for Rayleigh wave[C]. Proceedings of the Nondestructive Evaluation/Testing: New Technology & Application (FENDT), 2013 Far East Forum, 2013, 150-154.
- [16] TAKISHITA T, ASHIDA K, NAKAMURA N, et al. Development of shear-vertical-wave point-focusing electromagnetic acoustic transducer[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 54(7S1): 07HC4. 1-07HC04. 4.
- [17] NAKAMURA N, ASHIDA K, TAKISHITA T, et al. Inspection of stress corrosion cracking in welded stainless steel pipe using point-focusing electromagnetic-acoustic transducer[J]. NDT & E International, 2016, 83(10): 88-93.
- [18] JIA X J, OUYANG Q.. Influence of aperture angles and

- design focal depths on the performance of point-focusing shear vertical wave electromagnetic acoustic transducers[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 143(5): 2892-2900.
- [19] HILL S, DIXON S. Localisation of defects with time and frequency measurements using pulsed arrays[J]. NDT & E International, 2014, 67: 24-30.
- [20] 陈秋颖, 王小民, 李明轩, 等. 电磁声换能器的辐射声场研究[J]. 声学学报, 2009(4): 32-38.
CHEN Q Y, WANG X M, LI M X, et al. The radiated sound field of electromagnetic acoustic transducer [J]. ACTA ACUSTICA, 2009(4): 32-38.
- [21] XIE Y D, LIU Z H, YIN L Y, et al. Directivity analysis of Meander-Line-Coil EMATs with a wholly analytical method [J]. Ultrasonics, 2016, 73: 262-270.
- [22] 高松巍, 周佳伟, 杨理践, 等. 电磁超声表面波辐射声场的三维有限元分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 34(2): 192-197.
GAO S W, ZHOU J W, YANG L J, et al. Three-dimensional finite element analysis on radiation sound field of electromagnetic ultrasonic surface wave [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2012, 34(2): 192-197.
- [23] THOMPSON R B. The relationship between radiating body forces and equivalent surface stresses: Analysis and application to EMAT design [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1980, 1(2): 79-85.
- [24] SONG X C, QIU G Z. Optimization of a focusable and rotatable shear-wave periodic permanent magnet electromagnetic acoustic transducers for plates inspection[J]. Sensors, 2017, 17(12): 1-10.
- [25] PARDEE W J, THOMPSON R B. Half-space radiation by EMATs [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1980, 1(3): 157-181.
- [26] DIXON S, HILL S, FAN Y C, et al. The wave-field from an array of periodic emitters driven simultaneously by a broadband pulse [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 133(6): 3692-3699.
- [27] 孙鹏飞, 武新军, 从明. 磁致伸缩纵向导波管道检测数值建模与分析[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(6): 1250-1256.
SUN P F, WU X J, CONG M. Numerical modeling and analysis of the longitudinal guided wave pipe inspection based on magnetostrictive effect [J], Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(6): 1250-1256.
- [28] ISLA J, CEGLA F. Optimization of the Bias magnetic field of shear wave EMATs [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2016, 63(8): 1148-1160.
- [29] HAO K S, HUANG S L, ZHAO W, et al. Modeling and finite element analysis of transduction process of electromagnetic acoustic transducers for nonferromagnetic metal material testing [J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(3): 749-754.

作者简介



唐琴, 2018 年于四川轻化工大学获得学士学位, 现为南昌航空大学的硕士研究生, 主要研究方向为电磁超声检测。

E-mail: 915300840@qq.com

Tang Qin received her B.Sc. degree at Sichuan University of Science & Engineering in 2018. Now, she is a M.Sc. candidate at Nanchang Hangkong University, and her main research interest is electromagnetic acoustic testing.



石文泽 (通信作者), 2009 年于内蒙古工业大学获得学士学位, 2011 年于中南大学获得硕士学位, 2017 年于中南大学获得博士学位, 现为南昌航空大学讲师, 主要研究方向为电磁超声检测。

E-mail: 70658@nchu.edu.cn

Shi Wenzhe (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Inner Mongolia University of Technology in 2009, and received his M.Sc. and Ph.D. degrees both from Central South University in 2011 and 2017, respectively. Now, he is a lecturer at Nanchang Hangkong University, and his main research interest is electromagnetic acoustic testing.



卢超, 1995 年于江西师大获学士学位, 1998 年于中国科技大学获硕士学位, 2009 年于中国铁道科学研究院获博士学位, 现为南昌航空大学教授, 主要研究方向为超声检测及仪器。

E-mail: luchao@163.com

Lu Chao received his B.Sc. from Jiangxi Normal University in 1995, M.Sc. degree from University of Science and Technology of China in 1998 and Ph.D. from China Academy of Railway Sciences in 2009. Now, he is a professor in Nanchang Hangkong University. His main research interest includes ultrasonic non-destructive testing and instrumentation.