

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006195

厚壁管道线聚焦斜入射 SV 波 EMAT 辐射声场分析^{*}

张 金¹, 董子华¹, 石文泽², 王学彬¹, 王 鑫¹

(1. 中国人民解放军陆军炮兵防空兵学院 合肥 230031; 2. 南昌航空大学无损检测教育部重点实验室 南昌 330063)

摘 要: 由于圆弧型检测面的曲率半径对斜入射 SV 波 EMAT 辐射声场的影响规律尚不清楚, 导致厚壁管道线聚焦斜入射 SV 波 EMAT 的缺陷检测能力、缺陷定量/定位精度出现偏差。建立了基于平面/凸面检测面的线聚焦斜入射 SV 波 EMAT 的辐射声场有限元模型, 研究了凸面检测面的曲率半径、EMAT 曲折线圈匝数、设计初始角等因素对辐射声场的主瓣峰值和主瓣宽度的影响规律, 并与平面检测面进行了对比。结果表明, 与平面检测面相比, 凸面检测面起到聚焦超声波的作用, 具体表现在聚焦侧主瓣峰值增加 22.76%, 主瓣宽度减小 10.56%。在曲折线圈匝数超过 28 匝后, 线圈匝数的增加对主瓣峰值加强作用有限; 当曲率半径为 1.485×10^{-1} m, 线圈设计初始角为 10° , 曲折线圈匝数由 10 匝增加至 28 匝时, 线聚焦 SV 波主瓣峰值增加 102.56%, 主瓣宽度减小 57.99%。

关键词: 厚壁管道; 电磁超声换能器; 线聚焦 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

Radiation sound field analysis of line-focusing angled SV wave EMAT in thick-walled pipeline

Zhang Jin¹, Dong Zihua¹, Shi Wenzhe², Wang Xuebin¹, Wang Xin¹

(1. PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Heifei 230031, China; 2. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Due to the indeterminacy of the influence of the curvature radius of the curved detection surface on the radiation sound field of angled SV wave EMAT, the deviations would occur in the defect detection capability and defect quantification/positioning accuracy of the thick-walled pipe line-focusing angled SV wave EMAT. The finite element model for the radiation sound field of line-focusing angled SV wave EMAT based on plane/convex detection surfaces is established, the influences of the factors such as the curvature radius of the convex detection surface, number of turns of meander-line coil and design initial angle on the main lobe peak and width are studied. Subsequently, the detection results for the convex detection surface are compared with those for the plane detection surface. The results show that compared with the plane detection surface, the convex detection surface plays a role of focusing ultrasonic wave, which is specifically manifested by the increase of the main lobe peak on the focusing side by 22.76% and the decrease of the main lobe width by 10.56%. When the number of turns of the meander-line coil is increased to more than 28 turns, the increase of the number of turns of the coil has a limited effect on strengthening the main lobe peak. When the curvature radius is 1.485×10^{-1} m, the design initial angle of the coil is 10° and the number of turns of the meander-line coil is increased from 10 to 28, the main lobe peak of the line-focusing SV wave increases by 102.56%, and the main lobe width decreases by 57.99%.

Keywords: thick-walled pipe; electromagnetic acoustic transducer; line-focusing SV wave; radiation sound field

0 引言

电磁超声换能器 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT) 是一种基于电磁耦合原理在导电或导磁物体表面形成超声波的新型超声检测换能器。与传统压电超声换能器相比, EMAT 具有非接触、无需耦合剂、耐高温等优点, 适用于高温、表面粗糙、有包裹层等复杂苛刻检测环境^[1-3], 可依据检测需要选取不同的磁铁和线圈组合进而激励多模式超声波^[4]。但是, EMAT 也存在换能效率低、信噪比低、波辐射范围宽等不可忽视的缺点^[5], 因此有必要通过数字信号处理技术^[6-8]、几何聚焦方法^[9-13]等进行优化, 以提高检测微小缺陷的能力。

对于传统斜入射 (垂直剪切波) (shear vertical wave, SV 波) 国内外研究较为深入, Dhayalan 等^[14]设计了曲折线圈 EMAT 二维数值模型, 模拟产生 SV 波。Liang 等^[15]研究了传感器阵元参数对 SV 波相控阵 EMAT 方向性的影响, 发现阵元数越多, SV 波主瓣峰值越高、主瓣宽度越窄、指向性越优。苏日亮等^[16-17]将斜入射 SV 波应用于钢轨内部缺陷检测、厚壁管道裂纹检测。但是, 传统 EMAT 产生的 SV 波沿换能器两侧对称传播, 声波能量不聚焦, 信噪比有待提高。目前, 国内外学者针对此问题提出了聚焦型 EMAT 设计方法, 以达到聚焦声波、锐化声波方向性的作用。例如, Ogi 等^[9-10]首次提出线聚焦电磁超声换能器 (line-focusing electromagnetic acoustic transducer, LF-EMAT) 设计方法, 发现此探头激励出的 SV 波指向性明显优于传统 EMAT。王淑娟等^[11]提出了基于两个曲折线圈的单向线聚焦 EMAT 设计方法, 可在一个方向产生增强的 SV 波, 并验证了此探头用于缺陷检测的有效性。与 LF-EMAT 相比其聚焦侧 SV 波能量更强, 同时非聚焦侧能量得到更好抑制。Huang 等^[18]明确了 LF-EMAT 焦点位置的选择方法, 得到了焦点位置应适当靠近激励线圈以提高信号强度的结论。

综上所述, 线聚焦斜入射 SV 波 EMAT 已用于钢轨等平面型试件的检测, 并取得了较好的检测效果, 但关于将线聚焦斜入射 SV 波 EMAT 技术应用于厚壁管道检测的理论和实验研究尚不完善。同时, 凸面检测面曲率半径等因素会对 SV 波主瓣峰值、主瓣宽度、主声束指向性等辐射声场特性造成影响, 进而导致厚壁管道线聚焦斜入射 SV 波 EMAT 的缺陷定量/定位精度出现偏差。基于此, 本文以厚壁管道为研究对象, 建立凸面检测面线聚焦斜入射 SV 波辐射声场有限元模型, 分析曲折线圈匝数、线圈设计初始角、曲率半径等参数对辐射声场特性的影响, 从而为基于电磁超声线聚焦斜入射 SV 波技术的厚壁管道缺陷检测提供理论指导。

1 线聚焦斜入射 SV 波 EMAT 辐射声场有限元建模

1.1 斜入射 SV 波 EMAT 换能机理

在曲折线圈中通入高频电流, 将会在被测试样表面感生出相同频率的脉冲涡流, 并在永磁体产生的偏置静磁场作用下产生洛伦兹力。在洛伦兹力作用下, 试样产生周期性的振动并且以超声波的形式进行传播, 实现斜入射 SV 波的激励过程^[16], 如图 1 所示。

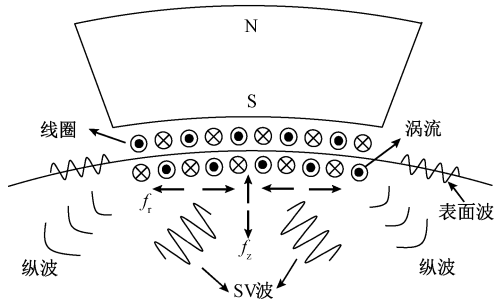


图1 斜入射 SV 波 EMAT 换能机理

Fig. 1 Transduction mechanism of angled SV wave EMAT

斜入射 SV 波的入射角 θ 与曲折线圈的导线间距 l 、波速 c 、激励频率 f 有关, 当满足式 (1) 时, 即可激励斜入射 SV 波^[19]。

$$\sin \theta = \frac{c}{2lf} = \frac{\lambda}{2l} \quad (1)$$

1.2 线聚焦斜入射 SV 波 EMAT 线圈设计

线聚焦斜入射 SV 波是由永磁铁、不等间距的曲折线圈共同作用产生。当曲折线圈相邻两根导线到聚焦点距离差为半个波长时即可激励出线聚焦斜入射 SV 波^[9]。LF-EMAT 线圈设计原理如图 2 所示, 设计参数及取值如表 1 所示。根据式 (2) 可得 n 匝线圈的具体位置 (x_{i+1} , 0)^[9]。

$$\sin \theta = \frac{c_s}{2lf} = \frac{|R \sin \theta - x_i - l_i/2|}{\sqrt{(R \sin \theta)^2 + (R \sin \theta - x_i - l_i/2)^2}} \quad (2)$$

式中: C_s 为 SV 波波速; x_i 为第 i 个线圈 x 坐标; 初始角 θ 为聚焦点与圆心连线和 z 轴夹角; l_i 为第 i 个线圈和第 $i+1$ 个线圈的间距。

线源产生的 SV 波位移 $\mu_\theta(r, \theta_s)$ 垂直于 SV 波的传播方向, 其具体数值描述如下^[20]。

$$\mu_\theta(r, \theta_s) = \frac{C}{\sqrt{r}} \frac{(\lambda + 2\mu) \cos 2\theta_s \cos \theta_s}{2\mu \sin 2\theta_s \sin \theta_L \cos \theta_L + (\lambda + 2\mu) \cos^2 2\theta_s} \times e^{j[(3/4)\pi - k_r r]} \quad (3)$$

$$\cos^2 \theta_L = 1 - \left(\frac{(\lambda + 2\mu)}{\mu} \right) \sin^2 \theta_s \quad (4)$$

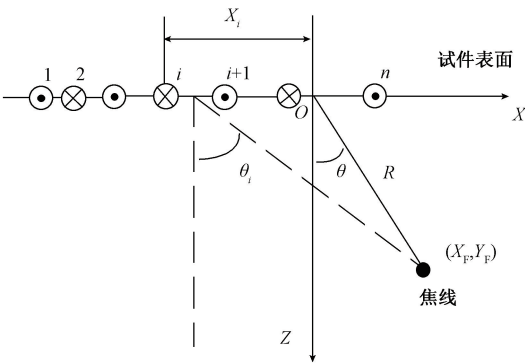


图 2 线聚焦斜入射 SV 波 EMAT 线圈设计原理
Fig. 2 Coil design principle diagram of a line-focusing angled SV wave EMAT

表 1 LF-EMAT 曲折线圈设计参数及其取值
Table 1 Design parameters of the meander-line coil of LF-EMAT and their values

参数	数值
检测频率 f/MHz	2
SV 波波速 $C_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	3 200
初始线圈横坐标 X_1/m	-0.07
聚焦点纵坐标 Y_F/m	0.06
线圈设计初始角 $\theta/(\circ)$	10 ~ 40
曲折线圈匝数 $n/\text{匝}$	10 ~ 46

式中: C 是常数; θ_s 为 SV 波传播方向; k_s 为 SV 波波数; λ 和 μ 为兰姆常数, 在此分别取 58、26 GPa。

SV 波幅值与入射角度之间的关系如图 3 所示。由图 3 可知, 入射角度为 30° 时振幅达到峰值, 超过 30° 时幅值急剧下降, 并在趋于 45° 时减为 0° 。这是因为, 在入射角度为 30° 时, 线圈中大部分能量用来产生横波, SV 波

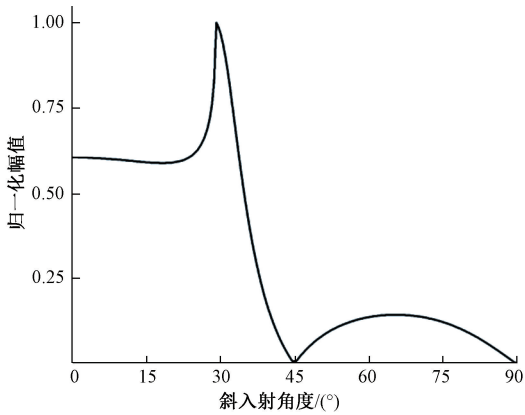


图 3 单匝导线激发 SV 波幅值
Fig. 3 Amplitude of the SV wave radiated by the single turn conductor

信号最强。为保证最佳聚焦效果, 本文选用 $19.5^\circ \sim 46.5^\circ$ 的入射角范围下的曲折线圈, 不同序号的线圈导线对应的相邻间距如图 4 所示。

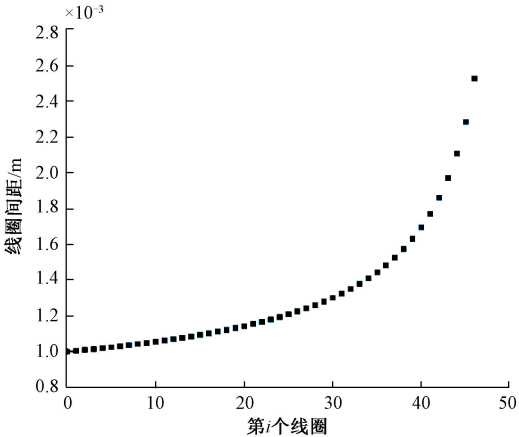


图 4 LF-EMAT 相邻导线间距
Fig. 4 The spacing of neighboring conductors of LF-EMAT

1.3 凸面检测面的辐射声场有限元建模

凸面检测面线聚焦斜入射 SV 波 EMAT 的辐射声场分析有限元模型如图 5 所示。在凸面检测面上设置不同间距的线段, 用于表示线聚焦斜入射 SV 波 EMAT 在检测面上的换能区域, 每一个线段代表不同序号的曲折线圈导线, 并在每个线段上加载相应的单位线载荷, 用于表示 EMAT 在检测面上形成的洛伦兹力。激励力函数描述如下:

$$f_i(t) = \begin{cases} (-1)^k [1 - \cos(\omega t/n)] \cos(\omega t), & 0 \leq t \leq (2n\pi)/\omega \\ 0, & t > (2n\pi)/\omega \end{cases} \quad (5)$$

式中: k 代表线圈每匝导线的序号; $\omega = 2\pi f$ 为中心频率; n 表示正弦脉冲串个数。

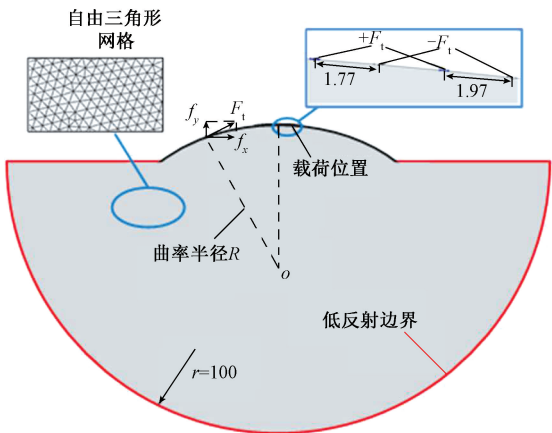


图 5 凸面线聚焦斜入射 SV 波有限元模型
Fig. 5 Finite element model of line-focusing angled SV wave for the convex surface

图7(a)中凸面检测面半圆形试块的7点接收到的A扫信号。

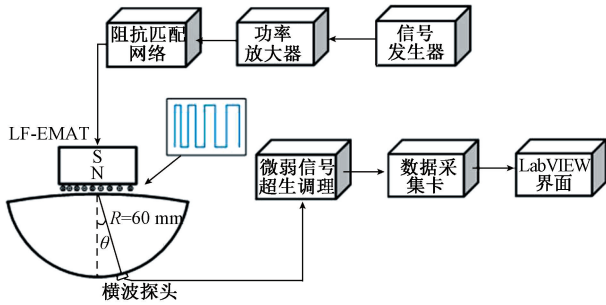
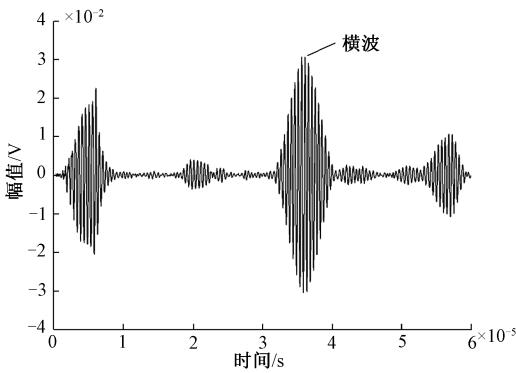
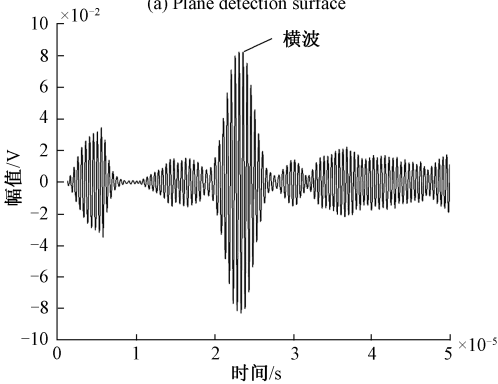


图9 凸面检测面线聚焦斜入射SV波声场测量实验系统

Fig. 9 Sound field measurement experiment system of line-focusing angled SV wave for convex detection surface



(a) 平面检测面
(a) Plane detection surface

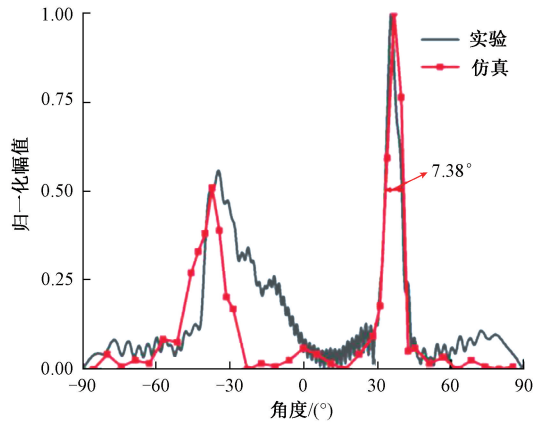


(b) 凸面检测面
(b) Convex detection surface

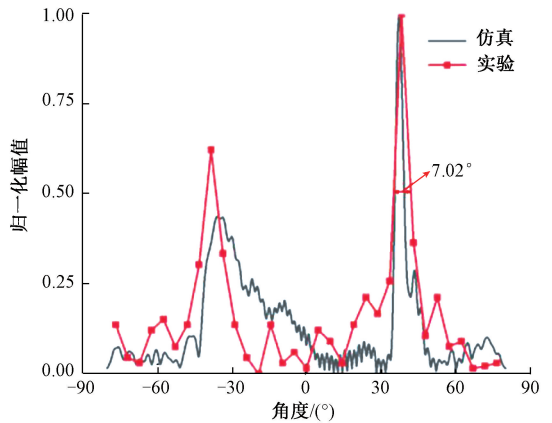
图10 线聚焦斜入射SV波A扫信号

Fig. 10 A-scan signal of line-focusing angled SV wave

平面/凸面检测面声场指向性仿真实验结果对比如图11所示。由图11可知,实验测定的辐射声场与仿真结果基本吻合。在某些测点接收的横波幅值出现波动,可能的原因是:1)横波波包和横波模式转换纵波波包重合或者主瓣与旁瓣波包混叠,导致横波波包幅值较难准确获取;2)实验中压电探头接收弧半径固定,无法保证接收到不同线圈匝数下最佳聚焦点信号。



(a) 平面检测面仿真与测量结果对比
(a) Comparison between the simulated and measured results for plane detection surface



(b) 凸面检测面仿真与测量结果对比
(b) Comparison between the simulated and measured results for convex detection surface

图11 线聚焦SV波辐射声场指向性仿真与测量结果对比

Fig. 11 Comparison between the simulated and measured directivity results of the radiated sound field of line-focusing SV wave

3 平面和凸面检测面的线聚焦SV波辐射声场特点

平面/凸面检测面的线聚焦SV波辐射声场如图12所示,红色弧半径 r 表示EMAT换能区域中心与聚焦点的距离。由图12可知,沿右侧传播的SV波聚焦效果明显,波能量、方向性优于左侧(非聚焦侧)。对比图12(a)、(b)可知,相同参数下,凸面检测面中SV波焦距小于平面检测面。

本文引入主瓣峰值、主瓣宽度两个指标定量分析线聚焦辐射声场特性,其中主瓣宽度是指主瓣半功率点之间的宽度;半功率点是幅值等于峰值一半的点。主瓣峰值是SV波能量最强处。

提取红色弧处SV波位移分布,按各自最大值分别进行归一化,如图13所示。由图13可知,聚焦侧主瓣峰值

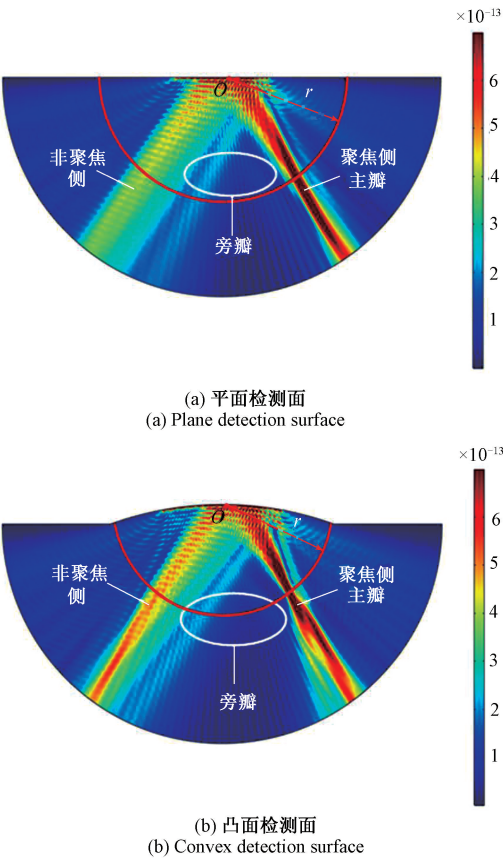


图 12 不同检测面的线聚焦 SV 波辐射声场对比
Fig. 12 Comparison of the radiation sound fields of line-focusing SV wave for different detection surfaces

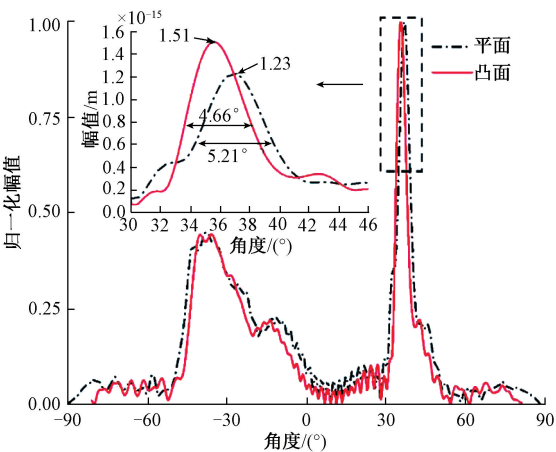


图 13 平面/凸面检测面的线聚焦 SV 波声场指向性对比
Fig. 13 Directivity comparison of line-focusing SV wave sound field between plane and convex detection surfaces

明显高于非聚焦侧,约高出 2 倍左右。相同设计参数下,平面/凸面检测面辐射声场特性存在差异,具体如表 3 所示。与平面检测面相比,凸面检测面起到聚焦超声波的

作用,主瓣峰值增加 22. 76%,主瓣宽度减小 10. 56%,主声束方向偏转 1. 31°。

表 3 平面/凸面检测面辐射声场参数对比
Table 3 Comparison of radiation sound field parameters between plane and convex detection surfaces

检测面	主瓣峰值/ 10^{-15}m	主瓣宽度/ $(^\circ)$	主峰指向角/ $(^\circ)$
凸面	1. 51	4. 66	35. 58
平面	1. 23	5. 21	36. 89

4 凸面检测面的线聚焦斜入射 SV 辐射声场影响因素分析

4.1 EMAT 线圈设计初始角

图 14 所示为不同初始角 θ 下的凸面检测面线聚焦 SV 波声场指向性图。当线圈设计初始角为 10° 、 40° 时,SV 波辐射声场云图如图 15(a)、(b) 所示。从图 14 中提取 SV 波主瓣峰值、主瓣宽度,得到初始角 θ 对声场特性的影响规律,如图 15(c) 所示。由图 15(c) 可知,主瓣峰值随着初始角增加先减小后增大;主瓣宽度随着初始角增加而增加,但增加趋势逐渐变缓。当初始角由 10° 增加至 30° 时,主瓣峰值下降 10. 60%,主瓣宽度增加 8. 80%;当初始角由 30° 增加至 40° 时,主瓣峰值虽有回升,但主瓣宽度仍然增加。因此为了改善 SV 波检测效果,有必要选择合适的初始角,初始角 10° 时接近最优。

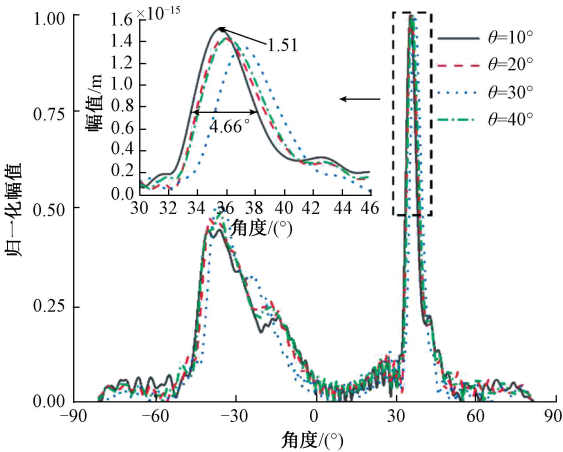


图 14 初始角 θ 对凸面检测面线聚焦 SV 波声场指向性的影响
Fig. 14 Influences of initial angle θ on the sound field directivity of line-focusing SV wave for convex detection surface

4.2 EMAT 曲折线圈匝数

曲折线圈匝数会对凸面检测面线聚焦 SV 波声场指向性造成影响,如图 16 所示。由图 16 可知,当线圈匝数

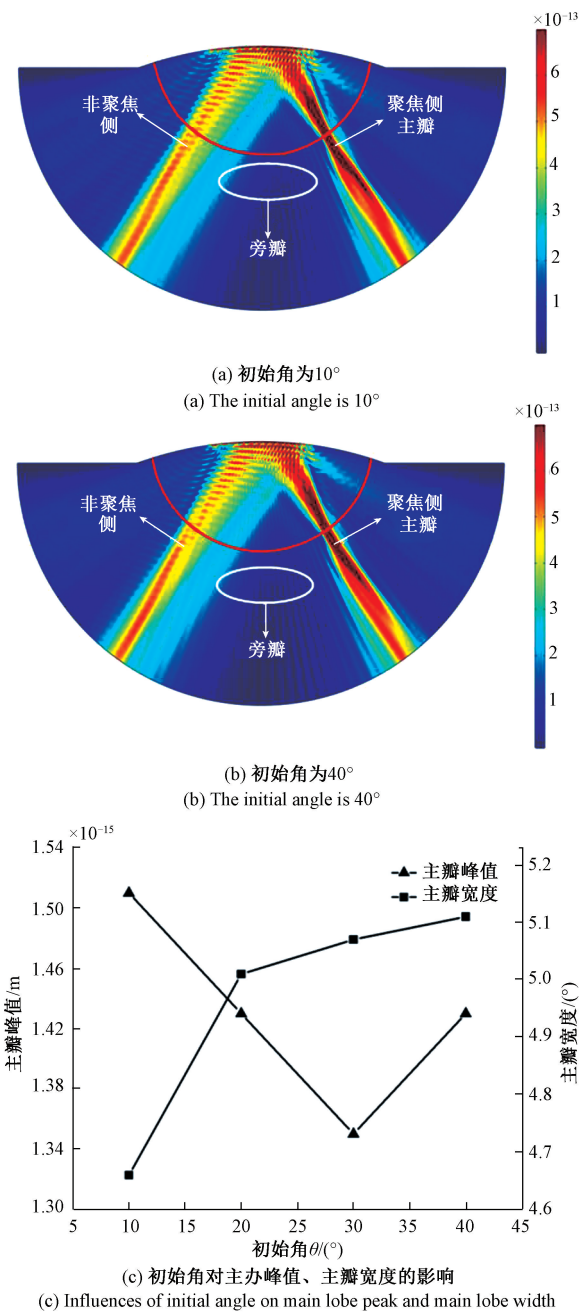


图 15 初始角 θ 对凸面检测面线聚焦 SV 波辐射声场特性的影响

Fig. 15 Influences of initial angle θ on the radiation sound field characteristics of line-focusing SV wave for the convex detection surface

大于 16 匝时,非聚焦侧 SV 波能量被较好抑制,聚焦侧 SV 波能量提升显著。

线圈匝数对凸面检测面线聚焦 SV 波辐射声场特性的影响如图 17 所示。图 17(a)、(b) 所示分别为 10 匝、46 匝线圈下的声场云图。

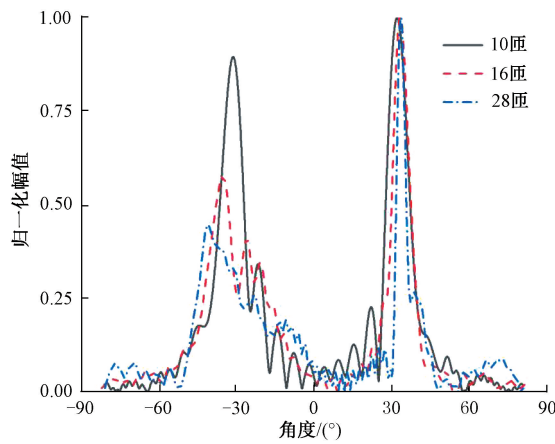
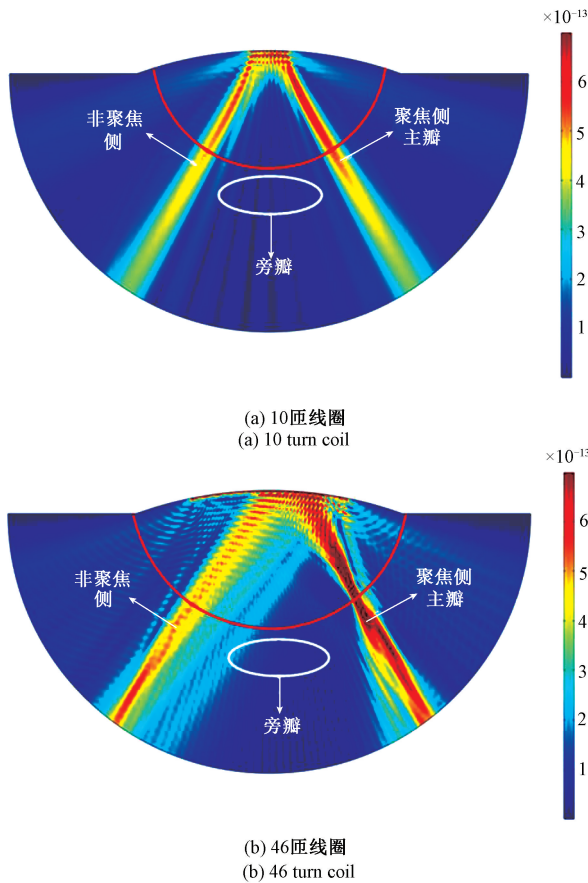


图 16 线圈匝数对凸面检测面线聚焦 SV 波声场指向性的影响
Fig. 16 Influences of number of turns of the coil on the sound field directivity of line-focusing SV wave for convex detection surface

由图 17(c) 可知,主瓣峰值随着线圈匝数增加而增加,但是当线圈匝数达到一定数值后,线圈匝数的增加对主瓣峰值的加强作用有限。当线圈由 10 匝增加到 28 匝时,主瓣峰值增加 102.56%。

由图 17(d) 可知,聚焦侧-非聚焦侧峰值之比随着线圈匝数增加而增大,当线圈由 10 匝增加至 40 匝时,峰值



(b) 46匝线圈
(b) 46 turn coil

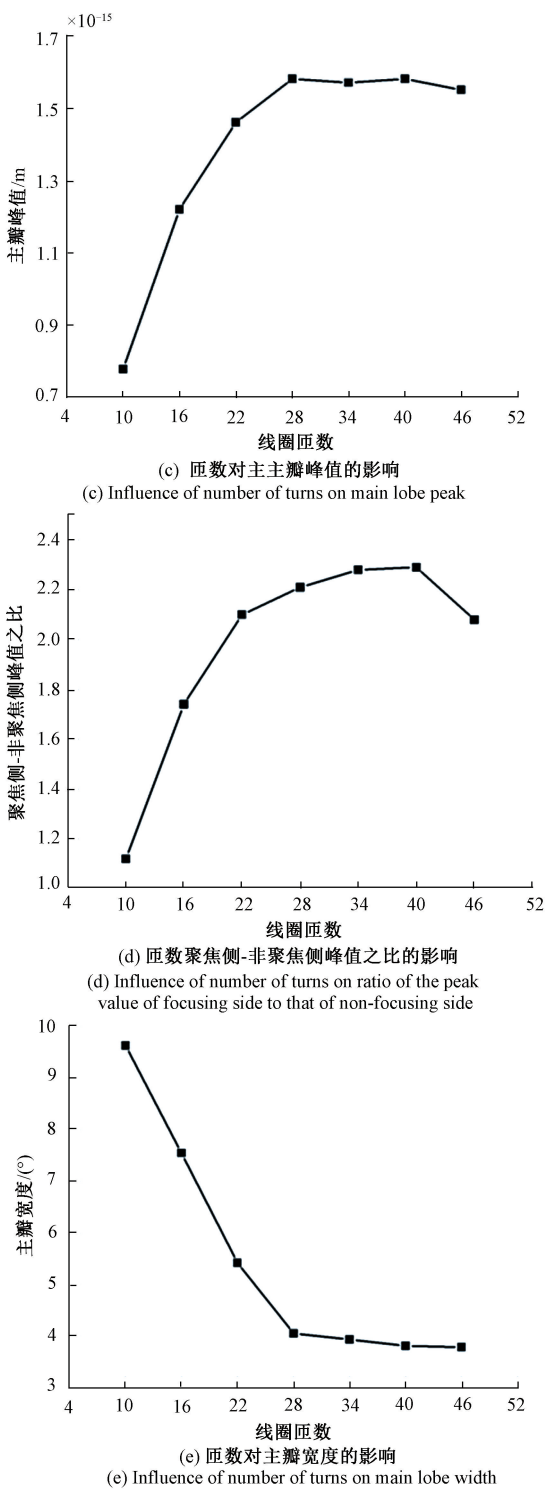


图 17 线圈匝数对凸面检测面线聚焦 SV 波辐射声场特性的影响

Fig. 17 Influences of number of turns of the coil on the radiation sound field characteristics of line-focusing SV wave for convex detection surface

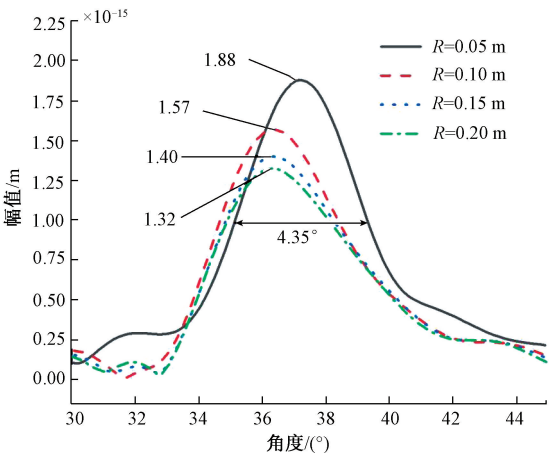
焦侧聚焦效果显著。但是当线圈匝数超过 40 匝时,聚焦侧-非聚焦侧峰值之比反而下降。这是因为线圈匝数过多使得主瓣能量分散至旁瓣能量中,同时产生的 SV 波入射角度较大,对聚焦侧效果的提升较小,但同时也会引起非聚焦侧能量的升高。

由图 17(e) 可知,主瓣宽度随着线圈匝数的增加呈下降趋势,同时减小的趋势逐渐变缓。当线圈由 10 匝增加到 40 匝时,主瓣宽度减小 60.48%。超过 40 匝后,增加线圈匝数,主瓣宽度基本不变。

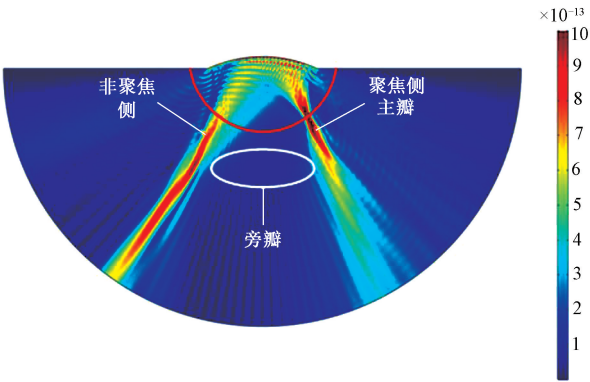
4.3 凸面检测面曲率半径

不同曲率半径对应的 SV 波聚焦点处位移分布如图 18 所示,其中曲率半径为 0.05、0.2 m 的辐射声场云图如图 18(b)、(c) 所示。曲率半径对线聚焦 SV 波辐射声场特性的影响如图 19 所示。

由图 19 可知,主瓣峰值随着凸面检测面曲率半径增加而减小,但减小趋势逐渐变缓。主瓣宽度则随曲率半径增加而呈上升趋势,当曲率半径由 0.05 m 增加至 0.2 m 时,主瓣峰值下降 29.78%,同时,主瓣宽度增加 19.77%。综上,凸面检测面曲率半径越小,线聚焦 SV 波的束向性越好。

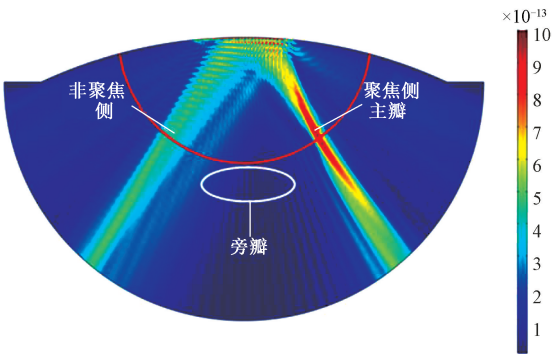


(a) 曲率半径对聚焦SV波幅值的影响
(a) Influence of curvature radius on line-focusing SV wave amplitude



(b) 凸面检测面的曲率半径为0.05 m
(b) The curvature radius of the convex detection surface is 0.05 m

比增加 104.46%,非聚焦侧 SV 波能量得到较好抑制,聚



(c) 凸面检测面的曲率半径为0.2 m
(c) The curvature radius of the convex detection surface is 0.2 m

图 18 曲率半径对凸面检测面线聚焦 SV 波
声场指向性的影响

Fig. 18 Influences of curvature radius on the sound field
directivity of line-focusing SV wave for convex detection surface

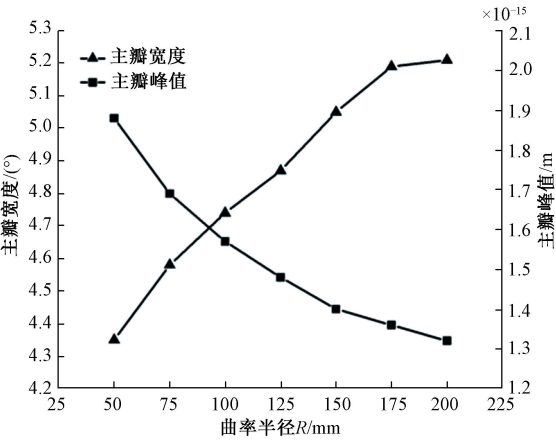


图 19 曲率半径对凸面检测面线聚焦 SV 波
辐射声场特性的影响

Fig. 19 Influences of curvature radius on the radiation sound
field characteristics of line-focusing SV wave for convex
detection surface

曲率半径对线聚焦 SV 波主峰指向角的影响如表 4 所示。

表 4 曲率半径对线聚焦 SV 波主峰指向角的影响

Table 4 Influences of curvature radius on main peak
pointing angle of line-focusing SV wave

曲率半径/m	主峰指向角/(°)
0.05	37.22
0.075	36.73
0.1	36.36
0.15	36.36
0.2	36.32

由表 4 可知,随着曲率半径越大,主峰指向角整体呈现减小趋势,当曲率半径由 0.05 m 增加至 0.2 m 时,主峰指向角偏转 0.9°。此角度的变化会导致缺陷定位的水平距离和垂直距离产生偏差。同时,曲率半径会影响主瓣峰值、主瓣宽度,进而对缺陷的定量分析造成干扰,影响缺陷检测灵敏度。

5 结 论

本文以厚壁管道为研究对象,通过建立凸面检测面线聚焦斜入射 SV 波辐射声场有限元模型,分析了曲率半径、线圈匝数、初始角 θ 与主瓣峰值、主瓣宽度、聚焦侧-非聚焦侧峰值之比的作用规律,主要结论如下:

1) 曲折线圈匝数会影响凸面检测面线聚焦 SV 波辐射声场特性。合适的线圈匝数增加能显著提高线聚焦 SV 波的主瓣峰值、聚焦侧-非聚焦侧峰值之比,降低主瓣宽度,提高缺陷检测灵敏度;而线圈匝数过多将导致非聚焦侧能量增加,同时也会导致 EMAT 探头尺寸变大,检测盲区增大,不利于检测。因此,本文所涉及的线聚焦斜入射 SV 波 EMAT 曲折线圈匝数保持在 28~40 匝较适宜。当检测频率、初始角和聚焦点改变时,对应的最佳线圈匝数也应该进行相应的调整。

2) 凸面检测面曲率半径和 EMAT 线圈设计初始角对线聚焦 SV 波主瓣峰值、主瓣宽度也起着重要作用。曲率半径的增加使各线源产生的 SV 波入射角度发生偏转,从而影响线聚焦效果。同时,初始角 θ 保持在 $[10^\circ, 20^\circ]$, 声场特性较优。因此,EMAT 探头参数设计应充分考虑线圈匝数、曲率半径、初始角 θ 对辐射声场的影响,选择最优设计参数,提高缺陷检测分辨能力。

3) 在相同设计参数下,凸面检测面的线聚焦 SV 波主瓣峰值、主瓣宽度均优于平面检测面。与平面检测面相比,凸面检测面的线聚焦 SV 波的聚焦能力进一步加强,进一步提高了缺陷检测能力。

参考文献

[1] PETCHER P A, POTTER M D G, DIXON S. A new electromagnetic acoustic transducer (EMAT) design for operation on rail [J]. NDT & E International, 2014, 65(3): 1-7.

[2] 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 K, 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.

[3] WANG SH, HUANG S L, WANG Q, et al.

- Characterizing excitability of lamb waves generated by electromagnetic acoustic transducers with coupled frequency domain models [J]. *Ultrasonics*, 2019, 93: 71-80.
- [4] DHAYALAN R, BALASUBRAMANIAM K. A hybrid finite element model for simulation of electromagnetic acoustic [J]. *NDT & E International*, 2010, 43 (6): 519-526.
- [5] SHI W Z, WU Y X, GONG H, et al. Optimal design of spiral coil electromagnetic acoustic transducers considering lift-off sensitivity operating on non-ferromagnetic media [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2016, 33(1): 56-74.
- [6] 胡松涛, 石文泽, 卢超, 等. 钢轨踏面裂纹电磁超声表面波同步挤压小波快速成像检测研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(1): 35-46.
- HU S T, SHI W Z, LU CH, et al. Research on rapid imaging detection of electromagnetic ultrasonic surface wave synchrosqueezed wavelet for rail tread cracks [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(1): 35-46.
- [7] 焦向东, 唐建, 戴波, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的管道超声检测信号处理 [J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(10): 1646-1650.
- JIAO X D, TANG J, DAI B, et al. Pipeline ultrasonic testing signal processing based on Hilbert-Huang Transform [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2016, 50(10): 1646-1650.
- [8] 何存富, 邓鹏, 吕炎, 等. 一种高信噪比电磁声表面波传感器及在厚壁管道检测中的应用 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53(4): 59-66.
- HE C F, DENG P, LYU Y, et al. A new surface wave EMAT with high SNR and the application for defect detection in thick-walled pipes [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(4): 59-66.
- [9] OGI H, HIRAO M, OHTANI T. Line-focusing of ultrasonic SV wave by electromagnetic acoustic transducer [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, 103(5): 2411.
- [10] OGI H, HIRAO M, OHTANI T. Line-focusing electromagnetic acoustic transducers for the detection of slit defects [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 1999, 46 (2): 341-346.
- [11] WANG S 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 & Frequency Control*, 2013, 60(12): 2657-2664.
- [12] 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]. *J Acoust Soc Am*, 2018, 143 (5): 2892.
- [13] LI Y Q, LI C, SU R L, et al. Unidirectional line-focusing shear vertical wave EMATs used for rail base center flaw detection [C]. 2016 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT). IEEE, 2016: 99-102.
- [14] DHAYALAN R, BALASUBRAMANIAM K, KRISHNAMURTHY C V, et al. Numerical simulation of pulsed meander coil EMAT [C]. *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 2010, 1211(1): 972-979.
- [15] LIANG B, ZHAI G F, WANG K C, et al. Influence of element parameters on SV-wave EMAT phased arrays directivity [C]. 2017 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin), IEEE, 2017: 1-5.
- [16] 苏日亮. 基于电磁超声斜入射 SV 波的钢轨缺陷检测方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- SU R L. Research of rail flaw detection method based on angled shear vertical wave EMATs [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [17] 苏日亮, 康磊, 冯剑钊, 等. 基于电磁超声斜入射 SV 波的厚壁管道裂纹检测系统 [J]. *无损检测*, 2010, 32(8): 641-644.
- SU R L, KANG L, FENG J ZH, et al. Crack-inspection device based on electromagnetic acoustic angled shear vertical wave for thick-wall pipelines [J]. *NDT*, 2010, 32(8): 641-644.
- [18] HUANG S L, SUN H Y, WANG SH, et al. Numerical evaluation of focal position selection by line-focusing electromagnetic acoustic transducer with experimental validation [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2019, 61 (3): 341-355.
- [19] OGI H, HIRAO M, OHTANI O. Flaw detection by Line-Focusing electromagnetic acoustic transducers [C]. 1997 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. An International Symposium (Cat. No. 97CH36118), IEEE, 1997, 1997(1): 653-656.

[20] MILLER G F, PURSEY H. The Field and Radiation Impedance of Mechanical Radiators on the Free Surface of a Semi-Infinite Isotropic Solid [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1954, 223(1155): 521-541.

[21] 石文泽, 吴运新, 龚海, 等. 非铁磁性金属材料螺旋线圈电磁超声换能器接收效率场路耦合[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(12): 3200-3208.

SHI W Z, WU Y X, GONG H, et al. Circuit-field coupled analysis of receiving efficiency of spiral coil electromagnetic acoustic transducer in non-ferromagnetic metal material [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(12): 3200-3208.

作者简介



张金(通信作者), 1995 年和 1998 年于四川大学获分别获得学士学位和硕士学位, 2012 年于清华大学获博士学位, 现为陆军炮兵防空兵学院教授, 主要研究方向为精密仪器与测试技术、声学测量及军事应用等。

E-mail: JGXYZhangJin@163.com

Zhang Jin (Corresponding author) received his B.Sc. and M. Sc. degree both from Sichuan University in 1995 and 1998, respectively. He received his Ph.D. degree from Tsinghua University in 2012. He is currently a professor at PLA Army Academy of Artillery and Air Defense. His main research interests include precision instrument and test technology, acoustic measurement and military applications.



石文泽, 2009 年于内蒙古工业大学获学士学位, 2011 年和 2017 年于中南大学分别获得硕士学位和博士学位, 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 received his B.Sc. degree from Inner Mongolia University of Technology in 2009, received his M.Sc. and Ph.D. degrees both from Central South University in 2011 and 2017, respectively. He is currently a lecturer at Nanchang Hangkong University. His main research interest includes electromagnetic acoustic testing.