

# 回折线圈导线长度对表面波 EMAT 性能 及缺陷检测的影响

邓 鹏, 何存富, 吕 炎, 刘增华, 焦敬品, 吴 斌  
(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

**摘 要:** 为了改善表面波电磁声传感器 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT) 的激励及接收性能, 并提高缺陷定量检测的准确性, 试验研究了 EMAT 中回折线圈导线长度对传感器频率特性、所激励表面波声场指向性、衰减特性的影响。采用不同长度回折线圈对人工裂纹进行检测, 得到了对应的反射和透射系数, 分析了导线长度和裂纹长度相互关系对缺陷定量检测的影响。试验结果表明, 表面波 EMAT 的频率特性与回折线圈导线长度无关, 但其所激励表面波的声场指向性及衰减速率与导线长度密切相关, 回折线圈导线长度越大, 声束辐射半张角越小, 表面波衰减越慢; 作为接收传感器, 回折线圈导线长度越大, EMAT 检测时空间分辨率越低, 但接收信号信噪比越高。导线长度小于裂纹长度时, 才能得到准确的反射和透射系数。

**关键词:** 表面波电磁声传感器; 导线长度; 声场指向性; 缺陷定量检测

**中图分类号:** TB 553

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2018)05-0665-07

**doi:** 10.11936/bjtxb2017080038

## Effect of Wire Length in Meander-line-coil on Performance of Surface Wave EMAT and Defect Detection

DENG Peng, HE Cunfu, LÜ Yan, LIU Zenghua, JIAO Jingpin, WU Bin

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** To improve the excitation and reception performance of surface wave EMAT and increase the accuracy for quantitative defect detection, the influence of wire length in meander-line-coil on the frequency characteristic, acoustic beam directivity and attenuation were studied experimentally. Meander-line-coils with different wire lengths were used to detect the artificial cracks, the reflection and transmission coefficients of surface wave were obtained, and the influence of the relation between wire length and crack length on quantitative detection of defect was analyzed. Results show that the frequency characteristic is independent of wire length, while the beam directivity and attenuation of surface waves are closely related to it. With the increase of wire length, the radiation half angle of surface waves beam decreases and the attenuation slows down. The space resolution of EMAT is reduced and the SNR of received signal increases with the increase of wire length when the EMAT is used as a receiver. The reflection and transmission coefficients can be measured accurately only when the wire length of meander-line-coils is smaller than the crack length.

**Key words:** surface wave electromagnetic acoustic transducer (EMAT); wire length; directivity of acoustic field; defect detection

收稿日期: 2017-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51235001)

作者简介: 邓 鹏(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事传感器测试技术、超声无损检测技术方面的研究, E-mail: dengpeng@emails.bjut.edu.cn

超声导波技术是一种较新型的无损检测技术,具有传播距离远、检测效率高、检测灵敏度高等优势,目前已广泛应用于管、杆、板等典型结构的缺陷检测及健康监测<sup>[1]</sup>. 表面波是一种特殊的超声导波模式,其传播只依赖一个边界,因此,适合厚板及厚壁管的缺陷检测<sup>[2-4]</sup>. 表面波另外一个特点是其波速与频率无关<sup>[5]</sup>,检测信号分析简单,应用方便.

表面波的能量主要集中在试件表面下一个波长的深度,因此,对表面及近表面裂纹十分敏感<sup>[6]</sup>,并常用于裂纹缺陷的深度定量表征<sup>[7-8]</sup>. 采用一激一收的检测方式,根据透射波的渡越时间,或者根据表面波在裂纹处的反射系数和透射系数,可以反演出缺陷的深度<sup>[9]</sup>. 研究显示,反射/透射系数法对深度较小的裂纹更加有效,但该方法依赖于入射波、缺陷反射回波和透射波幅值的准确提取,因此,需要一种测量重复性较好的表面波传感器.

实际检测中常用的表面波传感器有压电斜探头和电磁声传感器 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT). 压电传感器的优势是能量转换效率高、信噪比高,但是在检测时需要与试件有良好的接触,一般要借助耦合介质使压电片产生的振动传递到试件中,并且对试件表面光洁度有一定的要求. 电磁声传感器通过电磁耦合直接在导电或磁性试件中激发超声波,是一种非接触的检测方式,受试件表面状况及耦合条件影响小,测量可重复性高<sup>[10]</sup>.

电磁声传感器的主要不足是能量转换效率低、检测信号的信噪比和检测灵敏度稍差. 因此,大多数国内外学者关注的焦点主要是通过优化 EMAT 的结构参数,如磁场配置、线圈尺寸、提离距离等,来提高传感器的激励效率并改善信噪比<sup>[6,11-12]</sup>. 除此之外,表面波 EMAT 的声场指向性也是一项重要指标,也有一些学者对此进行了相关研究. 姚君等<sup>[13]</sup>试验测得了回折线圈 EMAT 的声场辐射半张角,给出了表面波 EMAT 辐射声场的指向性规律,并与压电传感器进行了比较. Xie 等<sup>[14]</sup>仿真模拟了不同长度回折线圈表面波 EMAT 的声场指向性,并用试验进行了验证. 根据研究结果,回折线圈型 EMAT 的声场指向性由回折线圈中的导线长度和导线间隔的比值决定. 在采用表面波 EMAT 进行缺陷定量检测时,回折线圈的导线长度不同,辐射声场与裂纹缺陷的相互作用也会不同,这会影响测量到的反射系数和透射系数,进而影响裂纹深度定量表征的准确性,而相关研究目前还未见报道.

本文用试验的方法,对回折线圈激发表面波的

声场指向性及沿传播方向的衰减特性进行研究,分析了导线长度对声场指向性和衰减特性的影响,并用不同导线长度的回折线圈对人工裂纹进行检测,探究了导线长度对表面波反射/透射系数的影响.

## 1 表面波 EMAT 和试验装置

表面波 EMAT 的组成通常包括永磁铁和回折线圈 2 部分,但在产生超声波的过程中,导电或铁磁性的待测试件也是必不可少的部分. 电磁声传感器产生超声波的工作机制主要为洛伦兹力机制和磁致伸缩机制. 在铁磁性材料中,2 种工作机制都会发挥作用;而在非铁磁性的金属试件中,其工作机制只有洛伦兹力机制. 本研究中被测试件为非铁磁性的金属材料,因此,这里讨论的是基于洛伦兹力机制的表面波 EMAT.

永磁铁提供强大的均匀静磁场,试验中采用的永磁铁尺寸为  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ ,沿  $15\text{ mm}$  厚度方向充磁,表面磁场强度约为  $0.4\text{ T}$ . 回折线圈中通以交变电流,产生交变的电磁场. 如图 1 所示,5 种回折线圈均为双层结构,6 匝分布,线圈中导线间隔  $D$  均为  $3\text{ mm}$ ,导线长度  $L$  分别为  $10$ 、 $20$ 、 $30$ 、 $40$ 、 $50\text{ mm}$ . 本研究中的待测试件为铝板,在交变磁场作用下产生涡流,涡流中的电荷在静态偏置磁场中受到洛伦兹力,带动质点产生高频振动,形成超声波. 铝板试件的尺寸为  $600\text{ mm} \times 450\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ .

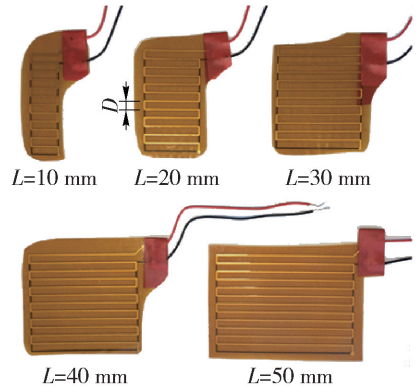


图 1 不同导线长度的回折线圈

Fig. 1 Meander-line-coils with different wire length

本研究使用的检测系统如图 2 所示,该系统主要包括:Ritec RPR-4000 高能脉冲发射接收仪、阻抗分析仪、数字示波器、EMAT 阻抗匹配网络、激励和接收传感器、铝板. 采用 RPR-4000 作为超声波激励装置,发射矩形窗调制的单频正弦信号. 阻抗分析仪和匹配网络用于表面波 EMAT 的阻抗匹配,以提高其能量转换效率. 激励信号作用于激励传感器,

在铝板中激发表面波. 接收传感器接收到的微弱信号通过 RPR-4000 的内置放大器放大,并经过带通滤波后,在示波器上显示.

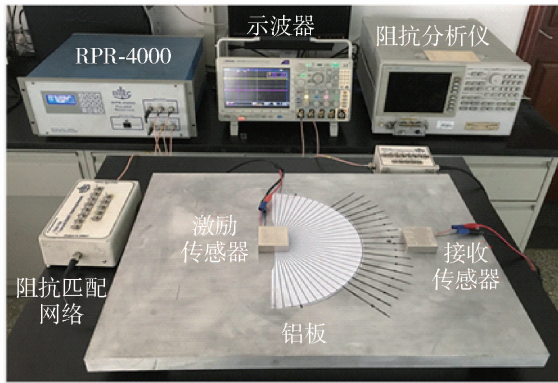


图2 试验装置

Fig. 2 Experiment set-up

铝板中的表面波波速  $c \approx 2\,930\text{ m/s}$ , 试验中使用的回折线圈导线间隔  $D = 3\text{ mm}$ , 激发出的表面波波长  $\lambda = 6\text{ mm}$ . 因此,通过计算可知,本研究中表面波 EMAT 的设计频率为  $490\text{ kHz}$ . 实验中,激励信号周期均采用 6 周期,放大器增益设置为  $80\text{ dB}$ ,带通滤波器范围设置为  $0.2 \sim 2.5\text{ MHz}$ ,激励电压设置为  $120\text{ V}$ . 数字示波器的采样点数为  $100\text{ k}$ ,数据采集为平均模式,平均次数设置为 256 次.

## 2 导线长度对表面波 EMAT 特性的影响

### 2.1 频率特性

首先测量了 5 种回折线圈组成的表面波 EMAT 的频率特性. 试验采用一激一收模式,激励传感器和接收传感器采用相同导线长度的回折线圈,2 个传感器的中心距为  $250\text{ mm}$ . 测量时的频率设置为  $380 \sim 600\text{ kHz}$ ,步长为  $10\text{ kHz}$ .

提取每个频率点接收的直达波峰峰值,并作归一化处理,得到测量结果如图 3 所示. 从图 3 可以看出,不同导线长度回折线圈的频率响应曲线基本一致,5 种线圈的中心频率为  $480\text{ kHz}$ ,并且  $-6\text{ dB}$  带宽均为  $110\text{ kHz}$  左右. 因此,回折线圈的导线长度  $L$  不会影响表面波 EMAT 的频率特性.

### 2.2 声场指向性

由图 3 得到的传感器实测中心频率与设计频率不一致,但以下试验仍将设计频率  $490\text{ kHz}$  作为传感器的激励频率. 在该激励频率下,测量不同导线长度回折线圈所激发表面波声场的指向性. 测量采用一激一收模式,激励传感器和接收传感器相距  $225\text{ mm}$ . 测量过程中激励传感器的位置和方向恒

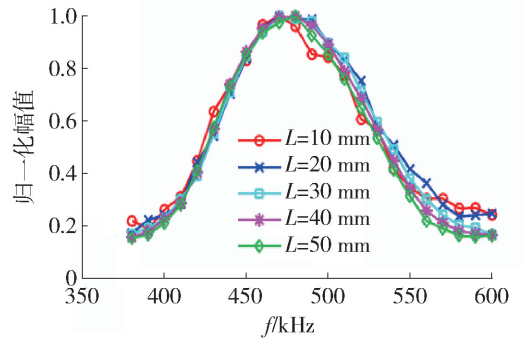


图3 不同长度回折线圈的频率特性

Fig. 3 Frequency characteristic of meander-line-coils with different wire length

定,接收传感器的相对位置从  $-45.0^\circ$  移动到  $45.0^\circ$ ,步长为  $2.5^\circ$ ,并且保持接收传感器的方向正对激励传感器.

首先采用  $L = 10\text{ mm}$  的回折线圈作为接收传感器,分别用 5 种不同导线长度的回折线圈作为激励传感器,测得的表面波声场指向性分布见图 4. 由图 4 可知,回折线圈导线长度对 EMAT 所激发表面波的声场指向性有直接影响. 5 种回折线圈对应传感器的声束辐射半张角  $\theta$  分别约为  $35^\circ$ 、 $17^\circ$ 、 $12^\circ$ 、 $8^\circ$ 、 $6^\circ$ ,与文献[14]的仿真结果一致,并且和文献[13]中的公式吻合. 当回折线圈导线间隔一定时,导线长度越大,EMAT 激发的表面波声束辐射半张角越小,声场指向性越好.

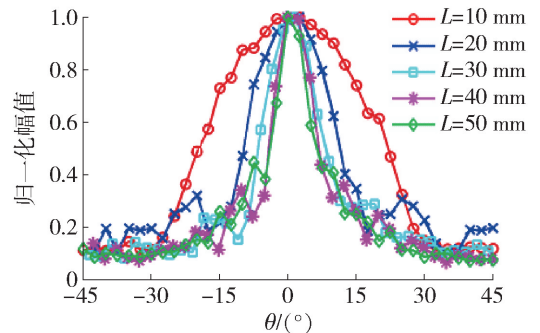


图4  $L = 10\text{ mm}$  线圈测得的表面波 EMAT 指向性

Fig. 4 Directivity of surface wave EMATs measured by the coil of  $L = 10\text{ mm}$

对应地,采用  $L = 50\text{ mm}$  的回折线圈作为激励传感器,分别用不同导线长度的回折线圈作为接收传感器,测得其激发表面波的声场指向性如图 5 所示. 可以看出,对于同一个激励 EMAT,不同导线长度回折线圈测得的声束辐射半张角基本吻合. 但是 5 条指向性曲线也存在明显差异, $L = 10\text{ mm}$  线圈可以清晰完整地检测到其声束的旁瓣分布, $L$  越大,检

测到的声束旁瓣越模糊,对于  $L = 50\text{ mm}$  的回折线圈,基本只能观察到主声束. 因此,作为接收传感器时,回折线圈的导线长度越大,其检测的空间分辨率越低.

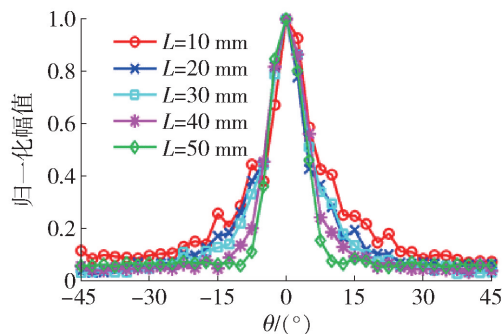


图5 不同线圈测得的  $L = 50\text{ mm}$  EMAT 的指向性  
Fig. 5 Directivity of EMAT with  $L = 50\text{ mm}$  measured by different meander-line-coils

### 2.3 表面波的衰减特性

表面波的衰减特性决定了其在试件中的传播距离,进而决定了其检测范围. 表面波在传播时,除了材料内部的散射衰减和吸收衰减外,还会受到扩散衰减的影响,而扩散衰减直接取决于传感器的声场分布. 分别测量5种回折线圈所激发表面波的衰减曲线,测量时激励传感器和接收传感器所使用的回折线圈导线长度相同,2个传感器的间距从  $100\text{ mm}$  增大到  $450\text{ mm}$ ,移动步长为  $50\text{ mm}$ .

提取每个点检测到的直达波峰峰值,并以  $100\text{ mm}$  间距的峰值为基准作归一化处理,得到的结果如图6所示. 可以看出,回折线圈导线长度越小,EMAT产生的表面波衰减越快;反之,回折线圈导线长度越大,EMAT产生的表面波衰减越慢. 对于  $L = 10\text{ mm}$  的 EMAT,  $450\text{ mm}$  处接收到的表面波峰值约为  $100\text{ mm}$  处的  $50\%$ ; 而  $L = 50\text{ mm}$  的 EMAT 所激发的表面波,传播相同的距离,幅值只下降了  $12\%$  左右.

实际上,回折线圈导线长度对所激发表面波的衰减特性的影响,是通过影响表面波的声场指向性间接实现的. 从表面波本身来看,其衰减特性与辐射声场的指向性有关. 表面波声束辐射半张角越小,说明表面波在传播过程中能量越集中,则表面波衰减得越慢;反之,表面波声束辐射半张角越大,在传播过程中其能量越发散,因此衰减得也越快. 在图6中,  $L = 40\text{ mm}$  和  $L = 50\text{ mm}$  两种传感器对应的衰减曲线相差不大,正是因为二者的声束辐射半张角非常接近.

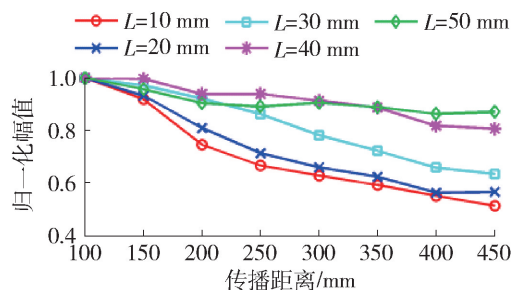


图6 不同传感器激发表面波的衰减曲线  
Fig. 6 Decay curves of surface waves excited by different EMATs

### 2.4 接收信号的幅值

回折线圈的导线长度不同,阻抗特性也会不同,会影响接收信号的幅值大小. 以  $L = 30\text{ mm}$  的回折线圈作为激励 EMAT, 分别用5种不同导线长度的回折线圈作为接收 EMAT, 在距离  $300\text{ mm}$  处检测表面波信号. 试验中激励传感器的阻抗匹配值保持不变,并且5种接收传感器采用相同的阻抗匹配设置.

不同传感器接收到  $L = 30\text{ mm}$  的回折线圈激发出的表面波时域信号原始波形如图7所示. 由图7可知,对相同的表面波声场分布,不同导线长度回折线圈在相同位置接收到的表面波信号幅值相差较大,导线长度越大,接收到的时域信号幅值越大.  $L = 50\text{ mm}$  回折线圈检测到的信号峰峰值约为  $1.93\text{ V}$ , 而  $L = 10\text{ mm}$  回折线圈检测到的信号峰峰值约为  $0.27\text{ V}$ . 而在5个时域信号中,噪声信号的幅值基本相同,因此,在相同的阻抗匹配条件下,回折线圈的导线长度越大,其接收信号的信噪比越高.

### 3 导线长度对缺陷检测的影响

表面波是一种非常有效的裂纹深度定量检测方法, Masserey 等<sup>[9]</sup>将渡越时间法和反射/透射系数法相结合,在单次检测中实现从小深度缺陷到大深度缺陷的完整检测,并且得到较高的测量准确度. 但传感器宽度和裂纹长度的相互关系对测量准确度的影响基本未有关注. 为了研究回折线圈导线长度对缺陷深度定量检测准确性的影响,在上述的铝板试件上加工了5个不同深度的矩形槽,模拟裂纹缺陷. 矩形槽深度  $a$  分别为  $0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5\text{ mm}$ , 宽度  $w$  均为  $0.5\text{ mm}$ , 长度  $l$  均为  $30\text{ mm}$ .

首先,利用 COMSOL 仿真软件模拟表面波与不同深度裂纹的相互作用规律,得到表面波在裂纹处的反射和透射系数曲线. 二维有限元仿真模型中表面波的波长  $\lambda = 6\text{ mm}$ , 矩形开口宽度  $b = 0.5\text{ mm}$ , 激

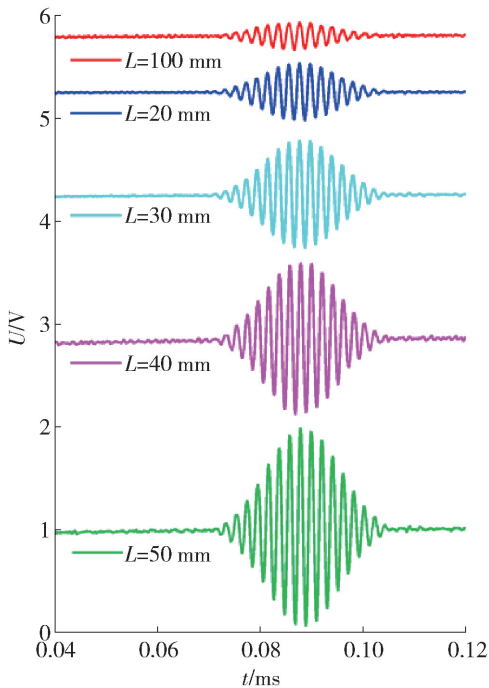


图7 不同线圈接收到的表面波信号

Fig.7 Surface wave signal received by different meander-line-coils

励信号为汉宁窗调制的6周期正弦波信号.在二维仿真中,表面波没有扩散衰减,因此,反射回波幅值与入射波幅值之比即定义为反射系数,透射波幅值与入射波幅值之比即定义为透射系数.仿真中,矩形开口的深度从0增大到6.0 mm,变化步长为0.1 mm,提取每个深度的反射系数和透射系数,即可得到表面波在矩形开口处的反射和透射系数曲线.

分别用导线长度  $L = 20、30、40、50$  mm 的回折线圈对铝板上不同深度的矩形槽进行检测,检测时激励 EMAT 和接收 EMAT 所用的回折线圈导线长度相同.传感器与缺陷的相互位置如图8所示,2个传感器均垂直于矩形槽的长度方向,并且三者的中心处于同一直线上.由此可知,接收 EMAT 放置在矩形槽和激励 EMAT 之间,可以检测到入射波和反射回波,并且入射波和反射回波的传播距离分别为150、250 mm;接收 EMAT 放置在矩形槽的另一侧时,可以检测到透射波,透射波的传播距离是250 mm.

试验中得到的入射波、反射回波和透射波的峰值并不能直接计算反射系数和透射系数,因为在实际检测中表面波的幅值会随传播距离的增大而产生衰减.此时要根据图6中对应的衰减曲线对测得的峰值进行补偿,然后用补偿后的反射回波与入射波

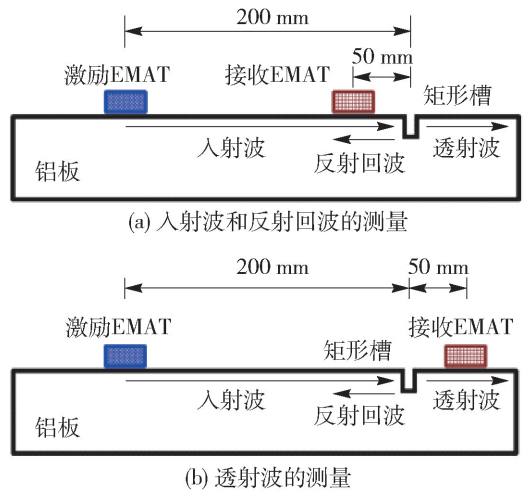


图8 激励和接收 EMAT 的放置位置

Fig.8 Arrangement of transmitter and receiver

峰值之比作为反射系数,用补偿后的透射波与入射波峰值之比作为透射系数.

试验得到的不同线圈激励的表面波在缺陷处的反射、透射系数与仿真得到的参考曲线的对比如图9所示.可以看出,4种不同导线长度回折线圈测得的反射和透射系数与仿真曲线的变化规律基本一致,但是数值吻合程度存在差异.当回折线圈的导线长度  $L$  小于矩形槽的长度  $l$  时( $L = 20$  mm),测量得到的反射和透射系数与参考曲线吻合较好;当  $L = l$  时( $L = 30$  mm),测量结果与参考曲线基本吻合;当  $L > l$  时( $L = 40$  mm,  $50$  mm),测量值仿真曲线差别较大.还要注意,当  $L \geq l$  时,试验测得的反射系数都小于仿真结果,并且  $L$  越大,偏差越大;相反,试验得到的透射系数都大于仿真结果,并且  $L$  越大,偏差越大.如果将上述检测结果用于裂纹深度的定量表征,那么  $L = 40$  mm 和  $L = 50$  mm 线圈都会得到不准确的深度估计值,因此这种偏差不可忽视.

回折线圈导线长度对检测结果准确性的这种影响可以解释为:在近场范围内,当裂纹长度  $l$  小于回折线圈的导线长度  $L$  时,接收线圈接收到的入射波幅值不受影响,但更多的表面波从裂纹的两侧继续向前传播,因此,反射回波减少,反射回波幅值降低,计算得到反射系数就会偏小;同时,从裂纹的两侧向前传播的表面波被当作透射波被接收线圈接收,也即接收到的信号包含一部分直达波,因此,接收信号幅值增大,计算得到的透射系数偏大.

为了验证这种解释的正确性,首先用  $L = 20$  mm 和  $L = 30$  mm 这2种回折线圈,分别作为激励和接收传感器,并改变激励线圈和接收线圈次序,检测信

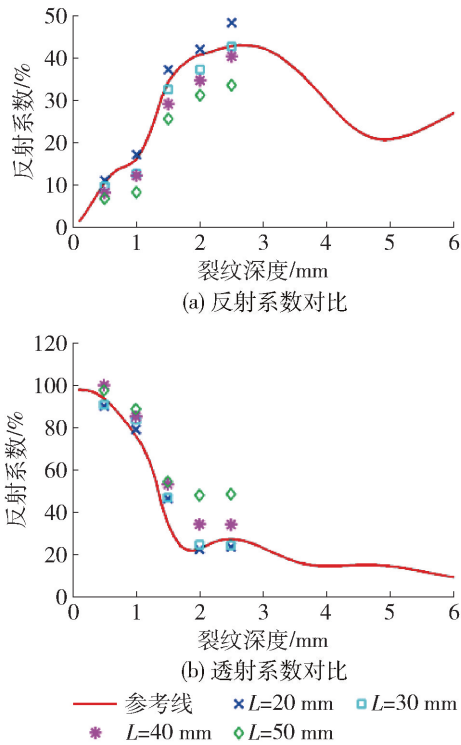


图9 实验测得的反射和透射系数与仿真结果对比  
Fig. 9 Comparison between measured reflection and transmission coefficients and simulated reference curve

号见图10. 由图可知,无论是 $L=30\text{ mm}$ 线圈作为激励, $L=20\text{ mm}$ 线圈作为接收,还是反之,试验测得的反射系数和透射系数与参考曲线都吻合较好. 结合图9所示的试验结果可以得出结论,当激励和接收传感器所用回折线圈的导线长度均不大于裂纹长度时,无论二者导线长度是否相同,均可得到准确的反射和透射系数.

对铝板上的矩形槽做进一步的检测,检测中激励传感器和接收传感器仍使用不同导线长度的回折线圈. 类似地,首先用导线长度 $L=50\text{ mm}$ 线圈激励,分别用 $L=20\text{ mm}$ 和 $L=30\text{ mm}$ 做接收,然后调换激励线圈和接收线圈次序,检测结果如图10所示. 由图可知,当激励线圈导线长度 $L_T$ 大于裂纹长度 $l$ 而接收线圈导线长度 $L_R$ 小于或等于裂纹长度 $l$ 时,也可以得到较为准确的反射系数和透射系数测量值. 但当 $L_T \leq l$ 且 $L_R > l$ 时,测量得到的反射系数和透射系数的偏差与图9所示的结果类似. 也就是说当 $L_R > l$ 时,仍能够接收到从裂纹两侧绕过来的表面波,因此,导致测量的透射系数大于参考曲线.

综合分析图9~11所示的试验结果可以知道,在对缺陷进行近场检测时,实际上是接收线圈的导

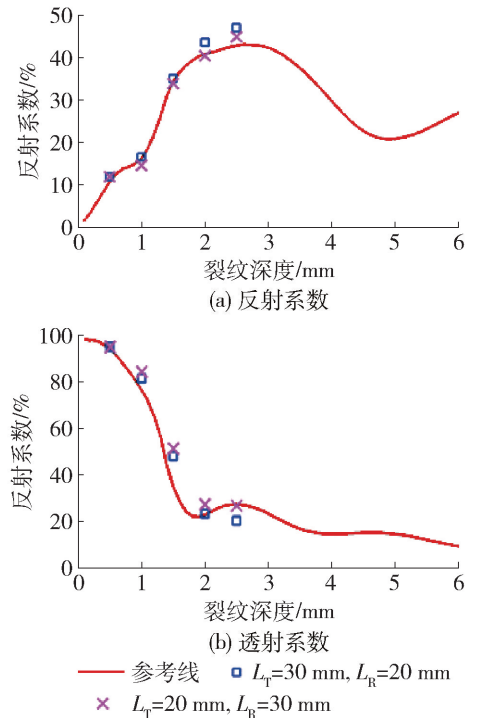


图10 导线长度 $L=20\text{ mm}$ 和 $L=30\text{ mm}$ 回折线圈测得的反射和透射系数  
Fig. 10 Reflection and transmission coefficients detected by meander-line coils with length  $L=20\text{ mm}$  and  $30\text{ mm}$

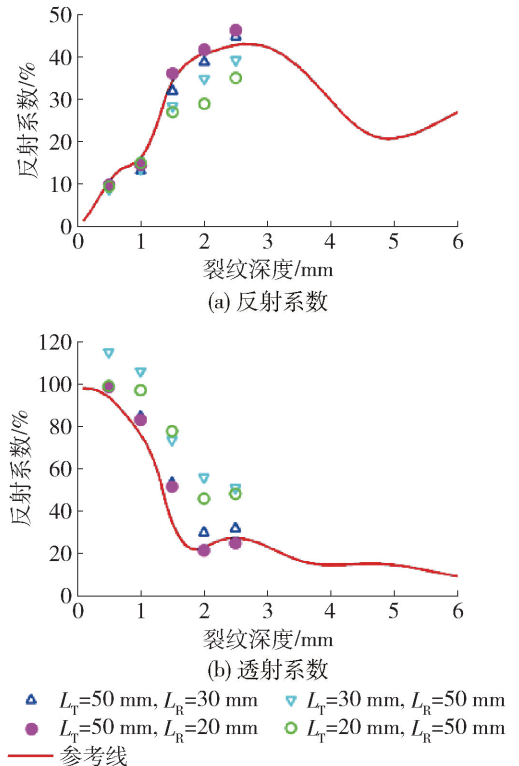


图11 激励和接收线圈不同时测得的反射和透射系数  
Fig. 11 Measured reflection and transmission coefficients with different exciting and receiving meander-line-coils

线长度与裂纹长度的相互关系决定了反射和透射系数测量值的准确性. 当接收线圈的导线长度小于或等于裂纹长度时,就可以得到准确的测量值;反之,当接收线圈的导线长度大于裂纹长度时,即使激励线圈导线长度较小,反射系数的测量值也会偏小,同时透射系数的测量值偏大.

## 4 结论

1) 回折线圈导线长度不会影响表面波 EMAT 的频率特性,但会影响其激发表面波的声场指向性和衰减特性. 回折线圈导线长度越大,EMAT 激发表面波的声束辐射半张角越小,声场指向性越好,同时表面波在传播路径上的衰减越慢.

2) 在用接收传感器时,回折线圈导线长度会影响表面波 EMAT 的检测分辨率和接收信号的信噪比. 导线长度越小,表面波 EMAT 的空间分辨率越高,但接收信号的信噪比越低.

3) 接收传感器中回折线圈导线长度会影响表面波 EMAT 对裂纹的检测结果. 使用表面波 EMAT 对缺陷的反射和透射系数进行测量时,当接收传感器中回折线圈的导线长度小于或等于裂纹长度,可以获得准确的测量结果;反之,当接收传感器中回折线圈的导线长度大于裂纹长度时,测量得到的反射系数小于仿真结果,而透射系数大于仿真结果,并且导线长度越大,偏差越大.

## 参考文献:

[1] 何存富,郑明方,吕炎,等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1713-1735.  
HE C F, ZHENG M F, LÜ Y, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1713-1735. (in Chinese)

[2] 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, LÜ 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. (in Chinese)

[3] 卢超,魏运飞,徐薇. 钢轨踏面斜裂纹超声表面波 B 扫成像检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2272-2278.  
LU C, WEI Y F, XU W. Study on B-scan imaging

detection for rail tread tilted cracks using ultrasonic surface wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(10): 2272-2278. (in Chinese)

[4] 王丽,武新军,汪玉刚. 基于电磁超声表面波干涉增强的钢板表面检测[J]. 无损检测, 2014, 36(4): 5-13.  
WANG L, WU X J, WANG Y G. Steel plate surface inspection based on interference enhancement of Rayleigh waves generated by EMAT [J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(4): 5-13. (in Chinese)

[5] COOK D A, BERTHELOT Y H. Detection of small surface-breaking fatigue cracks in steel using scattering of Rayleigh waves [J]. NDT & E International, 2001, 34(7): 483-492.

[6] WANG S, KANG L, LI Z, et al. 3-D modeling and analysis of meander-line-coil surface wave EMATs [J]. Mechatronics, 2012, 22(6): 653-660.

[7] JIAN X, DIXON S, GUO N, et al. Rayleigh wave interaction with surface-breaking cracks [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(6): 064907.

[8] EDWARDS R S, DIXON S, JIAN X. Depth gauging of defects using low frequency wideband Rayleigh waves[J]. Ultrasonics, 2006, 44(1): 93-98.

[9] MASSEREY B, MAZZA E. Ultrasonic sizing of short surface cracks[J]. Ultrasonics, 2007, 46(3): 195-204.

[10] EDWARDS R S, DIXON S, JIAN X. Characterisation of defects in the railhead using ultrasonic surface waves[J]. NDT & E International, 2006, 39(6): 68-475.

[11] JIAN X, DIXON S, GRATTAN K T V, et al. A model for pulsed Rayleigh wave and optimal EMAT design[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2006, 128(2): 296-304.

[12] 黄凤英,周正干. 静态偏置磁场对电磁超声换能器灵敏度的影响[J]. 机械工程学报, 2011, 47(10): 1-7.  
HUANG F Y, ZHOU Z G. Effect of static bias magnetic field on electromagnetic acoustic transducer sensitivity [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(10): 1-7. (in Chinese)

[13] 姚君,范弘,贾慧明. 电磁超声表面波声场指向性的试验研究[J]. 钢铁, 2005, 40(1): 55-57.  
YAO J, FAN H, JIA H M. Study of orientation of acoustic field of electromagnetic ultrasonic surface wave [J]. Iron and Steel, 2005, 40(1): 55-57. (in Chinese)

[14] XIE Y, LIU Z, YIN L, et al. Directivity analysis of meander-line-coil EMATs with a wholly analytical method [J]. Ultrasonics, 2016, 73: 262-270.