第 37 卷 第 1 期
2018 年 1 月

应用声学
Journal of Applied Acoustics

Vol. 37, No.1
January, 2018

◇ 汪承灏院士八十生辰学术论文 ◇

焊接薄板中S_0兰姆波对槽型缺陷响应特性的数值研究*

郑海超　朱新杰　高广健　邓明晰†

(陆军勤务学院　重庆　401331)

摘要　采用数值仿真方法，就焊接薄板中S_0兰姆波对槽型缺陷的响应特性以及焊缝对S_0兰姆波槽型缺陷检测灵敏度的影响开展了数值研究。数值仿真结果表明，S_{0_R}信号(经槽型缺陷反射的S_0兰姆波回波信号)的反射比率随槽型缺陷深度的增大而单调增加；S_{0_R}信号的反射比率随槽型缺陷宽度的变化呈非单调变化关系，可将S_{0_R}信号的反射比率及其持续时间一并加以考虑，以评价槽型缺陷宽度的变化。随着焊缝余高的增加，S_0兰姆波对槽型缺陷的检测灵敏度将降低；随着焊缝宽度的增加，S_0兰姆波对槽型缺陷检测灵敏度的影响并不明显；相比之下，焊缝余高是影响S_0兰姆波槽型缺陷检测灵敏度的主要因素。研究结果表明，将S_0兰姆波用于检测隐藏于焊缝背后的槽型缺陷，是具有可行性的。所得结果对于发展焊接薄板的超声兰姆波无损检测技术，具有一定的理论指导意义和实际参考价值。

关键词　焊接薄板，槽型缺陷，S_0兰姆波，响应特性

中图法分类号: O426.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-310X(2018)01-0136-09

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.01.020

Numerical study on response characteristics of S_0 Lamb waves to groove defects in welded thin plates

ZHENG Haichao　ZHU Xinjie　GAO Guangjian　DENG Mingxi

(*Army Logistics University, Chongqing* 401331, *China*)

Abstract　The response characteristics of the S_0 Lamb wave propagation to the groove defects, as well as the influences of the weld joint on the detection sensitivity of the S_0 Lamb wave to the groove defects, have been investigated using numerical simulations. The simulation results show that the reflection ratio of the S_{0_R} signal (i.e. the echo signal of the S_0 Lamb wave reflected by the groove defect) monotonously increases with increase in the depth of the groove defects. However, the change trend of the reflection ratio of the S_{0_R} signal is no longer monotonic with change in the width of the groove defects. It is proposed that the width of the groove defects can be evaluated via simultaneously considering both the reflected ratio of the S_{0_R} signal and its duration. It is found that the detection sensitivity of the S_0 Lamb wave to the groove defects decreases with increase in the weld reinforcement. In contrast, the detection sensitivity of the S_0 Lamb wave to the groove defects is found to be slightly influenced by the width of the weld joint. The weld reinforcement is a main factor that obviously affects the detection sensitivity of the S_0 Lamb wave to the groove defects. The simulation results show that it is feasible to use the S_0 Lamb wave to detect the groove defects hidden behind the weld joint. The results concluded in this paper lay a basis for further development of ultrasonic Lamb wave nondestructive testing technique for welded plate structures.

Key words　Welded thin plate, Groove defect, S_0 Lamb wave, Response characteristic

2017-10-31 收稿; 2017-12-18 定稿

*国家自然科学基金项目 (11474361, 11704410, 11574399)

作者简介: 郑海超 (1993-), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 研究方向: 超声检测。

† 通讯作者 E-mail: dengmx65@yahoo.com

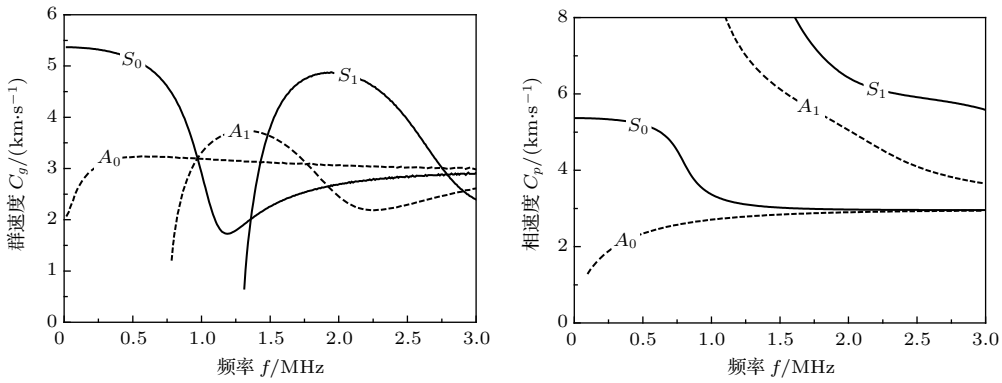
1 引言

焊接薄板结构因其良好的结构性能被广泛应用于现代装备制造业中。据统计，钢材经过焊接工艺加工成形的焊接结构产品占钢材消耗量的45%左右[1]，其中大量焊接薄板结构用于机械制造、石油化工、造船航海、航空航天以及建筑等领域。焊接薄板除了焊缝内部焊接工艺缺陷外，长期服役后母材还易形成直径当量达2~20 mm的蚀坑、腐蚀、裂纹、孔形及槽型缺陷等[2]。已有研究表明，对不同类型的缺陷可选择不同的兰姆波模式进行检测[3−5]。兰姆波在焊接薄板中传播时，在焊缝处将产生较为明显的声散射效应[6]，这将严重影响检测声信号的识别和分析。在实际检测过程中，焊缝的存在会增加检测的难度，并且严重影响检测结果的准确性。

众所周知，槽型缺陷是薄板中最为常见的一种缺陷，非常具有代表性。关于无焊缝薄板中兰姆波对槽型缺陷的响应特性，前人已开展过大量的研究。D. Alleyne 等应用有限元方法研究了兰姆波对槽型缺陷的响应特性[7]，将反射比率 (Reflection ratio) 与透射比率 (Transmission ratio) 用于评价槽型缺陷的深度以及频厚积对兰姆波传播特性的影响，其研究结果表明，当薄板表面的槽型缺陷的宽度小于兰姆波的波长时，缺陷宽度变化对兰姆波传播的影响并不明显，频厚积与缺陷深度才是影响兰姆波传播特性的两个重要因素。N. Terrien 等采用一种模式分解与有限元仿真相结合的方法[8]，研究了槽型缺陷对兰姆波模式转换和传播特性所产生的影响，相比于一般的有限元方法，该方法可检测高频厚积条件下板材表面的缺陷。K. Imano 等研究了槽型缺陷对兰姆波模式转换的影响[9]，提取了 A_0 模式遇到槽型缺陷后经模式转换而产生的 S_0 和 A_1 模式，用来表征缺陷损伤程度以及模式转换的比例。本文作者采用有限元数值仿真方法，研究了无焊缝薄板中 S_0 兰姆波的传播特性[10]，研究结果表明，采用 S_0 和 A_0 模式的反射系数可有效定征槽型缺陷的尺寸大下。随着兰姆波检测技术的发展，越来越多的学者开始关注兰姆波对焊缝的响应特性并将其用于焊缝的无损检测。J. Rose 等采用数值模拟和实验验证相结合的方法，研究了兰姆波反射和透射系数对搭接钢板几何尺寸变化的响应规律[11]，从而验证了利用兰姆波检测搭接板结构的可行性。M. Lowe 等通过有限元方法模拟研究了兰姆波在 1.6 mm 厚的搭接铝板上的传播规律，发现 A_0 和 S_0 模式的反射和透射系数可反映搭接区域尺寸的变化[12]。以上研究分别聚焦于兰姆波对槽型缺陷或焊缝的响应特性问题，但对于焊接薄板中兰姆波对槽型缺陷的响应特性问题，尤其是如何检测隐藏于焊缝背后的槽型缺陷，以及焊缝对超声兰姆波槽型缺陷检测灵敏度的影响等问题，目前所开展的工作还很少涉及。本文在建立二维有限元仿真模型的基础上，拟就焊接薄板中 S_0 兰姆波对槽型缺陷的响应特性开展系统的数值研究；所采用的建模思路、分析方法及所得结果，对于发展焊接薄板的超声兰姆波无损检测技术，具有一定的理论指导意义和实际参考价值。

2 兰姆波的模式选择

选择适当模式的兰姆波是开展薄板缺陷检测的基础。对于给定厚度的板材，在任意频率下存在



(a) 群速度频散曲线　　(b) 相速度频散曲线

图 1　兰姆波频散曲线

Fig. 1 Dispersion curves of Lamb waves

两种或两种以上的兰姆波模式。在实际超声检测中，不同兰姆波模式对缺陷的响应规律不同，且会直接影响检测结果。图1给出了兰姆波在3.6 mm厚的Q235钢板中的群速度和相速度频散曲线。

由图1可知，在小于 A_1 模式的截止频率(大约0.8 MHz)范围内，仅能激发出 S_0 和 A_0 两种兰姆波模式，且在该频率范围内，A_0 模式显示出比 S_0 模式更为严重的频散特性。此外，在该频率范围内，S_0 模式的群速度总是大于 A_0 模式，即采用 S_0 模式更易于避开因模式转换或各种声散射效应所造成的声信号在时域上的相互混叠问题。综上考虑，本文仅选用 S_0 兰姆波模式开展相应的数值研究。

3 二维有限元仿真模型

为简化分析模型，假设焊缝为理想的对接焊缝，即认为对接焊缝的内部形态完好且各向同性、沿板厚方向上下对称。本文采用COMSOL Multiphysics®软件进行相关数值模拟研究[13]，基于上述假设所建立的焊接薄板二维有限元仿真模型如图2所示，其中焊缝中心和缺陷中心距模型左端面分别为150 mm和500 mm。在模型左端的上下表面各设置一尺寸相同的PZT传感器作为激励源，用于激励所需的超声兰姆波模式，其长度和厚度分别为4.6 mm和0.1 mm。在图2模型中采用点接收方式接收信号，将信号接收点 R 与激励源置于同一侧以模拟信号的自发自收接收方式，点 R 距模型左端5 mm。有限元仿真模型中材料参数如表1所示。

表1 有限元模型的材料参数

Table 1 The material parameters of finite element model

材料	密度 ρ/(kg·m^{-3})	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
Q235钢	7850	200	0.33
PZT	7500	56	0.36
焊缝	7850	160	0.33

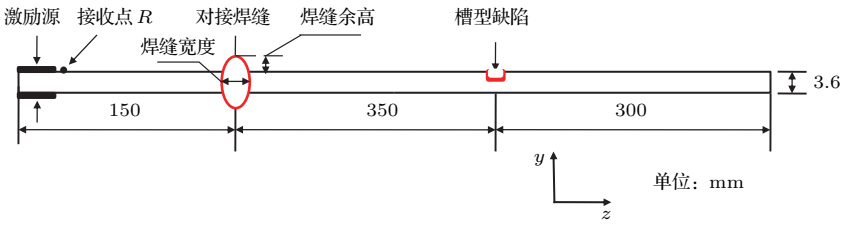


图2 兰姆波在焊接薄板中传播的二维有限元仿真模型

Fig. 2 Two-dimensional finite element simulation model of Lamb wave propagation in a welded thin plate

采用双元激励法可在薄板中激励出单一模式的兰姆波[14]。双元激励法利用兰姆波模式的对称或反对称特性，在薄板模型的上、下表面施加对称(同相)或反对称(反相)载荷，从而激励出所需的对称或反对称兰姆波模式。具体来说，就是对模型左端上下分布的两个激发源(PZT传感器)各施加一个沿法线方向的载荷，使薄板表面产生离面位移。若离面位移沿板厚方向呈反对称分布，则此时所激发的兰姆波为对称模式；若离面位移沿板厚方向呈对称分布，则此时所激发的兰姆波为反对称模式。

采用经Hanning窗加权的中心频率为0.5 MHz的正弦信号作为激励源(PZT传感器)的驱动电信号；经Hanning窗加权的正弦信号，其能量集中于中心频率附近，在传播过程中信号的发散小，对于信号的识别敏感度较高，其具体表达式如下[15]：

$$U(t)=\frac{1}{2}A\Big(1-\cos\frac{2\pi f_c t}{n}\Big)\sin(2\pi f_c t), \quad (1)$$

其中，A 为振幅，f_c 为正弦函数的中心频率(本文为0.5 MHz)，n 为周波数。

众所周知，有限元仿真分析中网格数量的多少将影响计算结果的精度和计算规模的大小；网格数量增加，计算精度会有所提高，但同时计算规模亦会增加，在确定网格数量时应综合权衡计算精度和规模这两个因素。图2所示模型中钢板的有限元网格类型为平面四边形、在焊缝和缺陷处为三角形；平面四边形和三角形的网格尺寸分别为0.5 mm (0.5 MHz的 S_0 兰姆波的理论波长为10.4 mm)和

0.1 mm，时间步长为 10^{-7} s[16]。

在图 2 所示的二维仿真模型中，设置焊缝余高为 1.6 mm、焊缝宽度为 4 mm。将载波频率为 0.5 MHz、周波数为 15 且经 Hanning 窗加权的时域信号，以同步反相方式激励模型左端的两个 PZT 传感器，即可在薄板中激发出 S_0 兰姆波模式。S_0 模式在焊缝处的声场分布如图 3 所示，图 3(a) 和图 3(b) 分别表示离面位移分布和面内位移分布。

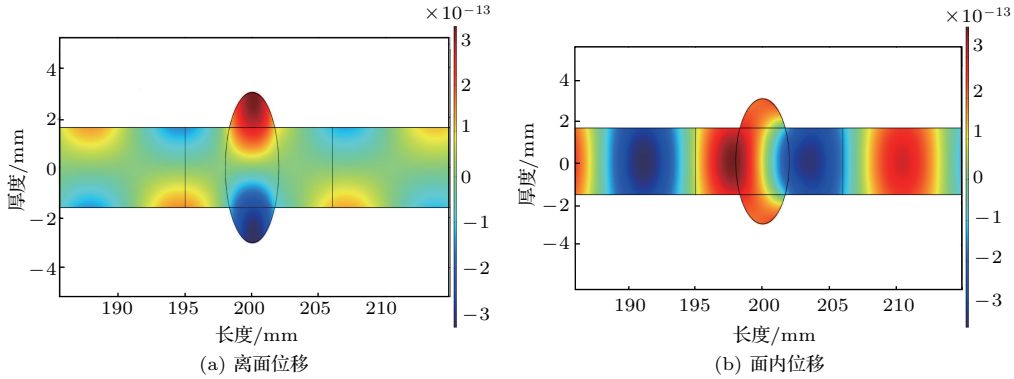


图 3　S_0 兰姆波在焊缝附近的声场分布 (时间为 4×10^{-5} s)

Fig. 3　Acoustic field distribution of the S_0 Lamb wave near the weld joint ($t=4\times10^{-5}$ s)

由图 3 可知，S_0 兰姆波在焊缝处的离面位移沿板厚方向呈反对称分布，面内位移沿板厚方向呈对称分布。这是由于在仿真模型中已将焊缝设置为沿板厚方向呈对称分布，焊缝的存在并未破坏板结构的对称性，故兰姆波在焊缝处声场的对称性亦不会被破坏，即并不会因焊缝的存在而使兰姆波发生模式转换。同理，当槽型缺陷未破坏板材沿厚度方向的对称性时，兰姆波在槽型缺陷处亦不会发生模式转换。当兰姆波的频率小于 A_1 模式的截止频率时，我们就图 2 所示的模型进行了数值仿真研究，结果表明，只有当焊缝或槽型缺陷破坏了板材沿厚度方向的对称性时，才可能导致兰姆波发生模式转换 (A_0 转换为 S_0 或 S_0 转换为 A_0)，即板材沿厚度方向对称性的破坏是兰姆波发生模式转换的根本原因。

4　仿真结果与分析

在图 2 的仿真模型中，设置槽型缺陷的深度和宽度分别为 1.5 mm 和 5 mm，将载波频率为 0.5 MHz、周波数为 15 且经 Hanning 窗加权的时域信号 (见式 (1))，以同步反相方式激励模型左端的两个 PZT 传感器，即可激励出沿薄板右侧传播的 S_0 兰姆波时域信号。对于焊缝余高和宽度分别取 (0 mm, 4 mm) 和 (1.6 mm, 4 mm) 两种情形，在点 R 处接收到的 S_0 兰姆波对槽型缺陷响应的时域信号如图 4 所示。

由图 4 可知，当焊缝余高为 0 时 (即无焊缝情形)，采用波速法可确定 S_0 兰姆波在受槽型缺陷反射之后，在反射信号中包含有 S_0 和 A_0 模式，表明 S_0 兰姆波在槽型缺陷处发生了模式转换。为便于叙述，将经槽型缺陷反射所产生的 S_0 和 A_0 兰姆波信号分别简称为 S_{0_R} 和 A_{0_R} 信号。由于 S_0 模式的群速度大于 A_0 模式，因此在接收点处首先接收到 S_{0_R} 信号，随后才接收到 A_{0_R} 信号。当有对接焊缝存在时，同样经波速法可确定，S_0 兰姆波在对接焊缝处

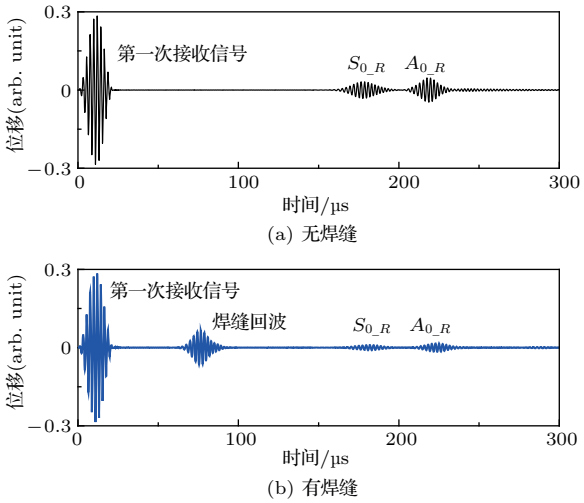


图 4　两种焊缝余高条件下兰姆波对槽型缺陷响应的时域信号

Fig. 4　Time-domain signals of Lamb waves versus the groove defect under the two weld reinforcements

仅产生了一个 S_0 模式的焊缝回波信号，在焊缝处并无模式转换发生。将图 4 中有、无焊缝的回波信号加以对比，发现有焊缝条件下 S_0 兰姆波对槽型缺陷的响应较无焊缝时减弱，其原因可归结为兰姆波在焊缝处发生散射进而导致穿过焊缝后其声能量大幅减弱。对比有、无焊缝条件下兰姆波对槽型缺陷响应的时域信号可知，S_0 兰姆波穿过焊缝后对槽型缺陷仍然有响应，且可清晰观察到反射的 S_{0_R} 和 A_{0_R} 信号。

兰姆波时域信号 (如图 4 所示) 包含有大量的槽型缺陷信息，入射 S_0 兰姆波与槽型缺陷发生相互作用之后，在点 R 处接收到的经槽型缺陷反射的时域信号反映了其与缺陷的相互作用关系。采用信号包络对时间积分的平方值描述信号所对应的声能量大小，定义 S_0 和 A_0 模式的反射比率 η_S 和 η_A 分别如下 [17]：

$$\eta_S = \left[\int I_{(S)}(t)\mathrm{d}t \Big/ \int I_{(\mathrm{in})}(t)\mathrm{d}t\right]^2,$$
$$\eta_A = \left[\int I_{(A)}(t)\mathrm{d}t \Big/ \int I_{(\mathrm{in})}(t)\mathrm{d}t\right]^2, \qquad (2)$$

其中 $I_{(\mathrm{in})}(t)$ 为在点 R 处第一次接收到的入射 S_0 兰姆波信号的时域包络，$I_{(S)}(t)$ 为在点 R 处接收到的 S_{0_R} 信号的时域包络，$I_{(A)}(t)$ 为在点 R 处接收到的 A_{0_R} 信号的时域包络；在数值分析过程中，以上包络均通过软件 Origin 8.5 中的信号包络提取功能直接获取。分别将 η_S 和 η_A 用于描述入射的 S_0 兰姆波信号在槽型缺陷处反射之后，S_{0_R} 和 A_{0_R} 信号的能量大小，显然它们包含有槽型缺陷的几何尺寸信息。在图 2 模型中，焊缝余高为零相当于无焊缝的情形。研究焊缝余高为 0 时 S_0 兰姆波对槽型缺陷的响应特性，是研究焊接薄板中 S_0 兰姆波对槽型缺陷的响应特性、焊缝对 S_0 兰姆波槽型缺陷检测灵敏度的影响等问题的前提和基础。

4.1 焊缝余高为 0 时 S_0 兰姆波对槽型缺陷深度的响应特性

当板厚为 3.6 mm、槽型缺陷宽度为 5 mm 时，将载波频率为 0.5 MHz、周波数为 15 且经 Hanning 窗加权的时域信号，以同步反相方式激励图 2 左端的两个 PZT 传感器，即可激励出沿薄板右侧传播的 S_0 兰姆波，其经槽型缺陷反射之后在点 R 处接收到的兰姆波对不同槽型缺陷深度的时域响应信号如图 5 所示。本文仅讨论反射信号对槽型缺陷深度的响应变化，故在时域上仅截取了包含有 S_{0_R} 和 A_{0_R} 的一段时域信号。

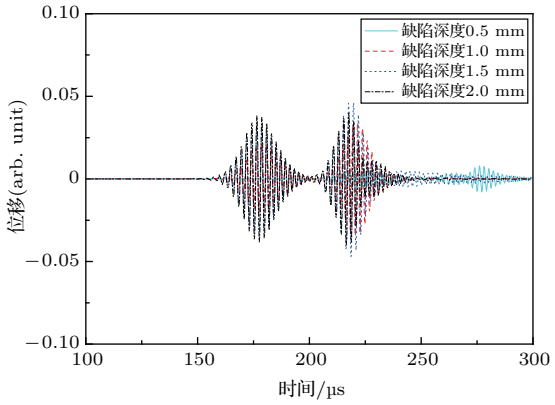


图 5 S_0 兰姆波对不同槽型缺陷深度的时域响应信号

Fig. 5 Time-domain response signals of the S_0 Lamb wave versus the groove defect with different depths

在图 5 中，S_{0_R} 和 A_{0_R} 信号的变化反映了缺陷深度的变化。对图 5 所示的点 R 处所接收到的时域包络信号按式 (2) 进行计算，得到 η_A 和 η_S 随槽型缺陷深度变化的响应曲线，如图 6 所示。

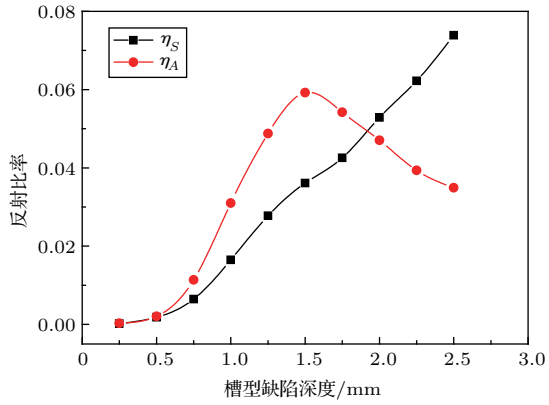


图 6 反射比率随槽型缺陷深度变化的关系曲线

Fig. 6 Curves of reflection ratio versus depths of groove defects

由图 6 可知，η_S 随槽型缺陷深度的增大而单调增加，这表明随着深度的增大声波在槽型缺陷处的反射效应增强；η_A 随槽型缺陷深度的增大先增加而后减小，这是由于 A_0 模式是由 S_0 模式在槽型缺陷处经模式转换而产生，若 S_{0_R} 信号的能量越来越大，因能量守恒，则 A_{0_R} 的能量就将相应减小。鉴于 S_{0_R} 信号对槽型缺陷深度的响应规律呈单调变化，结合其频散程度较小且群速度大的特点 (见图 1)，本文仅研究 S_{0_R} 信号对槽型缺陷尺寸变化的响应规律。

4.2 焊缝余高为 0 时 S_0 兰姆波对槽型缺陷宽度的响应规律

当板厚为3.6 mm、槽型缺陷的深度为1 mm时，将载波频率为0.5 MHz、周波数为15且经Hanning窗加权的时域信号，以同步反相方式激励图2左端的两个PZT传感器，即可在薄板中激励出沿右侧传播的 S_0 兰姆波，经槽型缺陷反射之后在点 R 处接收到的兰姆波对不同槽型缺陷宽度的响应时域信号如图7所示。

由图7可知，随着槽型缺陷宽度的增大，S_{0_R}/A_{0_R} 信号的波包将会拉长甚至分离，这是因为兰姆波在槽型缺陷前后两端均将发生反射，且槽型缺陷宽度方向与其传播方向相一致，当槽型缺陷宽度增加到一定程度时，经两次反射的兰姆波时域信号即出现图7所示的波包拉长甚至分离现象。这里仅研究 S_{0_R} 信号对槽型缺陷宽度的响应特性，对 S_{0_R} 信号的时域包络按式(2)进行计算，得到 η_S 随槽型缺陷宽度的响应曲线，如图8所示。

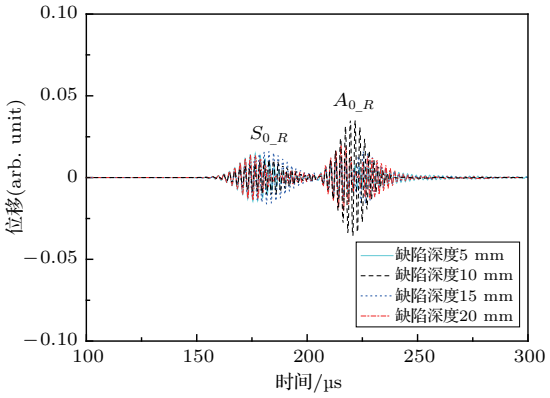


图7　S_0 兰姆波对不同槽型缺陷宽度的时域响应信号

Fig. 7 Time-domain response signals of the S_0 Lamb wave versus the groove defects with different widths

另一方面，因槽型缺陷宽度取向与兰姆波的传播方向相一致，由此可对反射时域信号的持续时间(即包络长度)产生较大的影响，可通过时域信号的包络计算其持续时间 τ，以从另一角度表征槽型缺陷的宽度变化。取时域信号包络最大峰值下降3 dB的前后时间之差，作为时域信号的持续时间 τ[10]。计算在点 R 处所接收到的 S_{0_R} 时域信号(见图7)的持续时间 τ，其随槽型缺陷宽度变化的关系曲线如图9所示。需注意的是，信号的持续时间与诸多因素有关，如信号的周波数、频率和信号接收点的位置等。

由图9可知，持续时间 τ 随槽型缺陷宽度的变化表现出较为复杂的规律。当槽型缺陷宽度小于10 mm时，持续时间 τ 随槽型缺陷宽度的增大而增加；持续时间 τ 在槽型缺陷宽度为10 mm 附近达到最大值；当槽型缺陷宽度大于10 mm时，持续时间 τ 随槽型缺陷宽度的增大而开始减小，随后在槽型缺陷宽度等于15 mm时又开始增大，达到极大值之后再次开始减小。尽管反射比率 η_S 和持续时间 τ 随槽型缺陷宽度的变化均不单调，但若同时测得 η_S 和 τ，据图8和图9，理论上亦可唯一确定槽型缺陷的宽度信息。

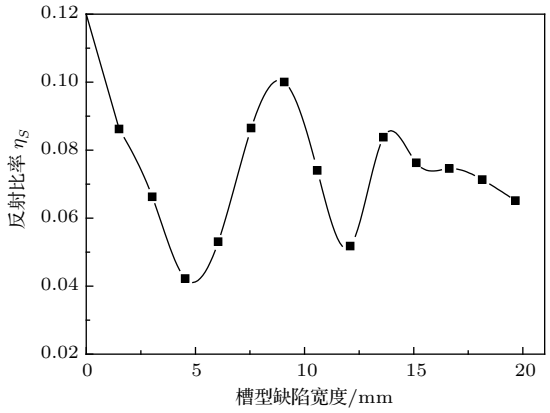


图8　反射比率随槽型缺陷宽度变化的关系曲线

Fig. 8 Curve of the reflection ration versus the widths of groove defects

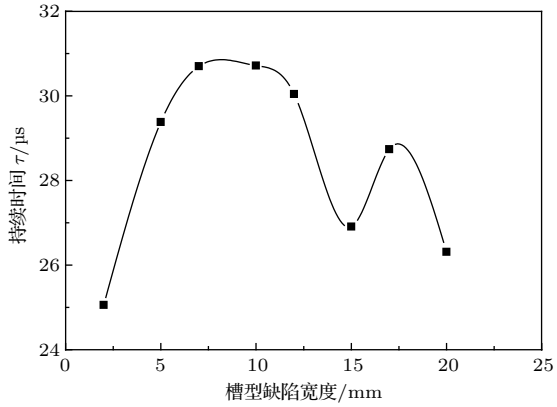


图9　持续时间 τ 随槽型缺陷宽变化的关系曲线

Fig. 9 Duration τ versus the widths of the groove defects

4.3 焊缝对 S_0 兰姆波槽型缺陷检测灵敏度的影响

由图4可知，在有焊缝条件下 S_{0_R} 信号对同一槽型缺陷的响应程度较无焊缝条件下减弱，表明焊缝的存在将减弱 S_0 兰姆波对槽型缺陷的响应程度。

本节主要聚焦于分析焊缝的余高和宽度对 S_0 兰姆波缺陷检测灵敏度的影响。

相关研究表明，焊缝的基本几何参数将对兰姆波的传播特性产生影响[18−21]，通常焊接薄板 (厚度为3~5 mm) 的焊缝宽度控制在3~8 mm 以内、余高控制在0~3 mm 以内。当焊缝余高大于3 mm时容易出现应力集中而导致焊缝质量严重下降。在实际检测过程中，当焊缝余高或缝宽尺寸超过一定范围时，采用超声方法有可能无法有效检测到焊缝背后槽型缺陷的尺寸变化。在图2所示的仿真模型中，控制焊缝余高在0~2.6 mm 范围内变化、焊缝宽度在3~6 mm 范围内变化。

4.3.1 焊缝余高的影响

在图2所示的仿真模型中，设置焊缝宽度为4 mm、缺陷宽度为5 mm；将载波频率为0.5 MHz、周波数为15且经Hanning窗加权的时域信号 (见式 (1))，以同步反相方式激励模型图2左端的两个PZT传感器。在不同余高条件下，计算在点 R 处接收到的 S_{0_R} 信号的反射比率 η_S 随槽型缺陷深度变化的关系曲线，如图10所示。

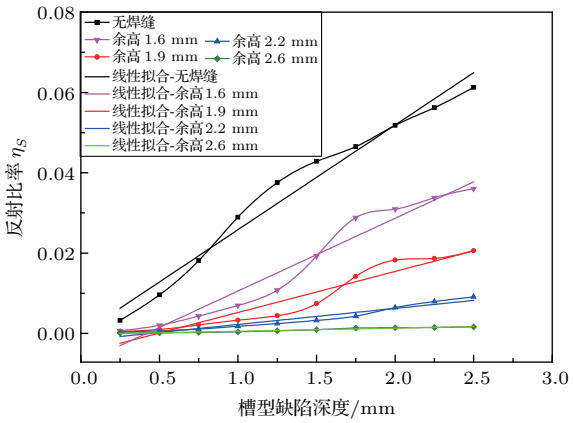


图10 不同焊缝余高条件下 S_{0_R} 信号的反射比率随槽型缺陷深度变化的关系曲线

Fig. 10 Curves of the reflected ratio of the S_{0_R} signal versus the defect depth under different weld reinforcements

由图10可知，在不同焊缝余高条件下，S_{0_R} 信号的反射比率对槽型缺陷深度的响应变化趋势，均随着缺陷深度的增大而单调增加。对图10中五组不同余高条件下的数据进行线性拟合，拟合直线斜率如表2所示。需说明的是，S_{0_R} 信号的反射比率随槽型缺陷深度的变化并不严格呈线性关系，在此仅以其拟合直线的斜率 (槽型缺陷单位深度改变所引起的反射比率变化)，从总体趋势上描述 S_0 兰姆波对槽型缺陷深度的响应灵敏度。

由表2可知，随着焊缝余高的增大，拟合直线的斜率将单调减小；尤其是当焊缝余高增大至2.6 mm时，拟合直线的斜率等于0.11，此时拟合直线几乎与水平轴平行。拟合直线的斜率在一定程度上反映了 S_{0_R} 信号的反射比率对槽型缺陷深度的响应灵敏度，据此可得到如下结论：当焊缝余高在0~2.6 mm的范围内时，随着焊缝余高的增大，兰姆波在焊缝处的能量散射逐渐增强，导致 S_0 兰姆波对缺陷深度的响应灵敏度逐渐降低；尤其是当焊缝余高增大至2.6 mm时，此时几乎难以识别出槽型缺陷深度的变化。

表2 线性拟合参数

Table 2 Linear fitting parameters

焊缝余高/mm	拟合直线斜率 (arb. unit)
0	3.65
1.6	2.54
1.9	1.43
2.2	0.56
2.6	0.11

4.3.2 焊缝宽度的影响

将载波频率为0.5 MHz、周波数为15且经Hanning窗加权的时域信号，以同步反相方式激励模型左端的两个PZT传感器。设置焊缝余高为1.6 mm，槽型缺陷宽度为5 mm；改变焊缝宽度，计算点 R 处接收到的 S_{0_R} 信号的反射比率随槽型缺陷深度变化的关系曲线，如图11所示。

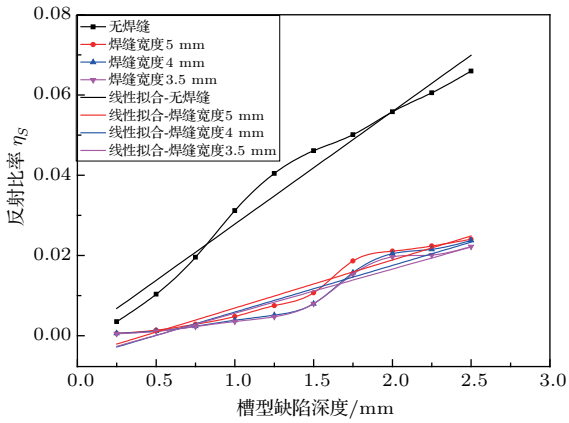


图11 不同焊缝宽度下 S_{0_R} 信号的反射比率随缺陷深度变化的关系曲线

Fig. 11 Curves of the reflected ratio of the S_{0_R} signal versus the defect depth under the different weld widths

由图 11 可知，在不同焊缝宽度条件下，S_{0_R} 信号的反射比率随槽型缺陷深度的增加而单调增大。对图 11 中 4 组不同焊缝宽度条件下的仿真数据进行线性拟合，可计算得到相应的斜率，仍以这些斜率值从总体趋势上描述 S_0 兰姆波对槽型缺陷深度的响应灵敏度。不难看出，有焊缝条件下拟合直线的斜率小于无焊缝情形，表明焊缝使得 S_0 兰姆波对槽型缺陷深度变化的响应灵敏度降低。在有焊缝条件下，随着焊缝宽度的增加，拟合直线斜率的差异并不明显。将图 10 和图 11 加以对比可知，关于 S_0 兰姆波对槽型缺陷深度的检测灵敏度，焊缝余高比焊缝宽度的影响更为明显。

本节主要研究了焊缝余高和宽度对 S_0 兰姆波槽型缺陷深度检测灵敏度的影响。数值仿真结果表明，在焊缝宽度不变的条件下，随着余高的增加，S_0 兰姆波对槽型缺陷深度的检测灵敏度降低，尤其是当焊缝余高增至一定高度时，已不能有效识别槽型缺陷深度的变化。在焊缝余高不变的条件下，焊缝宽度对 S_0 兰姆波槽型缺陷深度检测灵敏度的影响并不明显。

5 结论

采用有限元数值模拟方法，本文分别研究了焊接薄板中 S_0 兰姆波对槽型缺陷的响应特性，以及焊缝对 S_0 兰姆波槽型缺陷检测灵敏度的影响等问题。主要结论如下：

(1) 当薄板的焊缝余高为 0 时，S_{0_R} 信号的反射比率随槽型缺陷深度的增大呈单调增加的变化趋势；S_{0_R} 信号的反射比率随槽型缺陷宽度的变化趋势较为复杂，通过引入 S_{0_R} 信号的持续时间，将其与反射比率同时加以考虑，可唯一确定槽型缺陷的宽度信息。

(2) 当有焊缝存在时，研究结果表明，焊缝余高在一定取值范围内，随着焊缝余高的增加，S_0 兰姆波对槽型缺陷深度的检测灵敏度将降低，尤其是当余高增至一定高度时，已难以识别出缺陷深度的变化。焊缝余高是影响 S_0 兰姆波缺陷检测灵敏度的主要因素，而焊缝宽度对 S_0 兰姆波缺陷检测灵敏度的影响相对较小。

本文所采用的建模思路、分析方法及所得结果，对于发展焊接薄板的超声兰姆波无损检测技术，具有一定的理论指导意义和实际参考价值。

参 考 文 献

[1] 林尚扬, 于丹, 于静伟. 压力容器焊接新技术及其应用 [J]. 压力容器, 2009, 26(11): 1–6.
Lin Shangyang, Yu Dan, Yu Jingwei. New welding technologies for pressure vessel manufacturing[J]. Pressure Vessel Technology, 2009, 26(11): 1–6.

[2] 车月明, 张华俊. 焊接结构中常见缺陷的成因和防止措施 [J]. 机械管理开发, 2009, 24(3): 74–75.
Che Yueming, Zhang Huajun. The cause and prevention of defect in welded structure[J]. Mechanical Management and Development, 2009, 24(3): 74–75.

[3] Diligent O, Grahn T, Bostrom A, et al. The low-frequency reflection and scattering of the S0 Lamb mode from a circular through-thickness hole in a plate: finite element, analytical and experimental studies[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2002, 112(6): 2589–2601.

[4] Benz R, Niethammer M, Hurlebaus S, et al. Localization of notches with Lamb waves[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2003, 114(2): 677–685.

[5] 刘增华, 何存富, 吴斌, 等. 利用兰姆波对板状结构中隐蔽腐蚀缺陷的检测 [J]. 实验力学, 2005, 20(2): 166–170.
Liu Zenghua, He Cunfu, Wu Bin, et al. Hidden corrosion detection in plate-like structures using Lamb waves[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(2): 166–170.

[6] 朱新杰, 韩赞东, 都东, 等. 边界散射对超声水平剪切导波成像检测的影响 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(16): 14–19.
Zhu Xinjie, Han Zandong, Du Dong, et al. Influence of boundary scattering on imaging and inspection of ultrasonic shear horizontal-guided waves[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(16): 14–19.

[7] Alleyne D N, Cawley P. The interaction of Lamb waves with defects [J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, 1992, 39(3): 381–397.

[8] Terrien N, Osmont D, Royer D, et al. A combined finite element and modal decomposition method to study the interaction of Lamb modes with micro-defects[J]. Ultrasonics, 2007, 46(1): 74–88.

[9] Imano K, Endo T. Experimental study on the mode conversion of Lamb wave using a metal plate having a notch type defect[J]. Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour., 2013, 19(1): 20–23.

[10] 郑海超, 朱新杰, 邓明晰. 超声 Lamb 波与薄板中槽型缺陷相互作用的数值模拟 [J]. 后勤工程学院学报, 2017, 33(2): 69–75, 81.
Zheng Haichao, Zhu Xinjie, Deng Mingxi. Numerical simulation on interaction between ultrasonic Lamb waves and groove defects in a thin plate[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2017, 33(2): 69–75, 81.

[11] Song W J, Rose J L, Galan J M, et al. Ultrasonic guided wave scattering in a plate overlap[J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, 2005, 52(5): 892–903.

[12] Lowe M J, Challis R E, Chan C W. The transmission of Lamb waves across adhesively bonded lap joints[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2000, 107(3): 1333–1345.

[13] 王刚, 安琳. COMSOL Multiphysics 工程实践与理论仿真-多物理场数值分析技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.

[14] 蔡建, 袁慎芳, 张逍越, 等. Lamb 波双面激励方法及其在近邻损伤监测中的应用 [J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(1): 62–67.
Cai Jian, Yuan Shenfang, Zhang Xiaoyue, et al. Lamb wave double side excitation and its application in adjacent damage monitoring[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(1): 62–67.

[15] 刚铁, 刘强. 薄板结构中 Lamb 波的检测与仿真 [J]. 无损检测, 2013, 35(7): 24–28.
Gang Tie, Liu Qiang. Detection and simulation of the Lamb wave in thin plate structure[J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(7): 24–28.

[16] Yang C, Ye L, Su Z, et al. Some aspects of numerical simulation for Lamb wave propagation in composite laminates[J]. Compos. Struct., 2006, 75(1/2/3/4): 267–275.

[17] 吴斌, 周伟, 何存富. Lamb 波在搭接板中传播规律的数值仿真研究 [J]. 压力容器, 2011, 28(6): 24–30.
Wu Bin, Zhou Wei, He Cunfu. Experimental and numerical study of the lamb waves propagation in overlapping plates[J]. Pressure Vessel Technology, 2011, 28(6): 24–30.

[18] 石锋, 谢建平, 梁桠东. 超声波探伤检测的影响因素分析及监督与控制 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12(25): 6448–6453.
Shi Feng, Xie Jianping, Liang Yadong. Factor analysis, supervision and control for ultrasonic flaw test[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(25): 6448–6453.

[19] 田双. 焊缝余高对超声波探伤的影响 [J]. 无损检测, 2002, 24(5): 227–229.
Tian Shuang. Effect of weld reinforcement on ultrasonic inspection[J]. Nondestructive Testing, 2002, 24(5): 227–229.

[20] 陈振华, 史耀武, 赵海燕. 点焊试件中兰姆波传播的有限元模拟及其应用 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(10): 14–18.
Chen Zhenhua, Shi Yaowu, Zhao Haiyan. Finite element modulation of Lamb wave propagation for nondestructive evaluation of spot weld[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(10): 14–18.

[21] 郝淑英, 孙永宾, 张昆鹏, 等. 对接焊缝数值模拟方法研究 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2016, 49(1): 110–114.
Hao Shuying, Sun Yongbin, Zhang Kunpeng, et al. Study of numerical simulation for butt weld[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(1): 110–114.