

激光焊熔宽的超声检测精度提升

黄治轶¹, 王春生¹, 贺 帅², 谷晓鹏³, 董 娟^{3*}, 徐国成³

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司 工程技术中心工程规划发展部, 吉林 长春 130000;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 吉林大学 材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:在超声无损检测时, 搭接激光窄焊缝接头尺寸较小, 采用传统 6 dB 法对其界面处的熔宽判定存在较大的误差。为了提高检测精度, 通过研究传统 6 dB 法的检测误差来源, 采用有限元分析方法分析了激光焊接头内部入射超声波的传播规律和反射回波特性, 构建了基于修正 6 dB 法的激光焊接头熔宽评估模型, 并通过物理实验进行了验证。研究结果表明, 上板底面的一次回波幅值可作为反映接头内部结构的特征值, 当探头中心对应接头内部焊缝熔合线边缘位置时, 一次回波幅值的衰减度随上板板厚而变化, 据此可根据上板板厚选择衰减度值对传统 6 dB 法进行修正, 从而定量计算接头内部板层接触面处的有效熔宽。实际激光焊接头的超声检测结果证实: 采用修正 6 dB 法求解出的激光焊接头的熔宽与物理实验结果吻合良好, 对实际生产中超声检测激光焊接头的精度提升提供了参考。

关键词:激光搭接焊; 超声波检测; 有限元分析; 修正 6 dB 法

中图分类号: TG441.7

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2020-0149

Improvement of the ultrasonic testing accuracy of laser welding fusion width

HUANG Zhi-yi¹, WANG Chun-sheng¹, HE Shuai², GU Xiao-peng³, DONG Juan^{3*}, XU Guo-cheng³

(1. *Engineering Planning and Development Department, Engineering Technology Center,*

CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130000, China;

2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics (CIOMP),*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. *College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)*

** Corresponding author, E-mail: dongjuan@jlu.edu.cn*

Abstract: Due to the tiny dimensions of lap laser welding joints, there is significant error in weld width detection when using the traditional 6 dB method. In order to improve the method's detection accuracy and study its source of error, the finite element analysis method is used to analyze the propagation law of incident ultrasonic waves and reflected ultrasonic echo characteristics inside a laser-welded joint. Based on a modified 6 dB method, a laser welding joint melt width evaluation model is constructed and verified through physical experiments. The experimental results show that the primary echo amplitude of the bottom surface

收稿日期: 2020-08-24; 修订日期: 2020-10-20

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (No. 20190302044GX); 长春市科技计划项目 (No. 18SS016)

Supported by Science and Technology Development Plan of Jilin Province (No. 20190302044GX); Changchun Science and Technology Plan (No. 18SS016)

of the upper plate can be used as a characteristic value that reflects the internal structure of the joint. When the center of the probe corresponds to the edge of the weld fusion line inside the joint, the attenuation of the primary echo amplitude varies with the thickness of the upper plate, and the traditional 6 dB method can be modified according to the attenuation degree which related to the upper plate's thickness. Based on this, the effective weld width at the contact surface of the inner plate of the joint can be calculated quantitatively. The ultrasonic testing results of the actual laser welding joints confirmed that the melt width of the laser welding joints obtained by the modified 6 dB method agree with the results of the physical experiments, which means that this provides a very practical method for accurate ultrasonic testing of laser welding joints in real-world production.

Key words: laser lap welding; ultrasonic testing; finite element analysis; modified 6 dB method

1 引言

激光焊具有焊接速度快, 焊后变形小等优势, 在轨道交通及汽车行业得到广泛应用^[1-7]。搭接激光焊接头是车体中最常使用的接头形式, 而板层接触面处的熔宽是衡量接头连接强度的重要指标^[8-10]。然而, 在实际的焊接过程中, 装卡精度不够、激光参数波动等因素均会对激光焊接头的熔合状态造成影响^[11-12]。因此, 激光焊接头熔宽的焊后检测与评估非常重要。

生产过程中最常采用的检测方式是破坏性检测, 该方法效率低, 材料浪费严重^[13-14]。近年来, 国内外许多学者都致力于对激光焊接头无损检测的研究。超声波无损检测技术由于具有安全、高效以及经济性等多种优势而备受关注^[15-16]。常用的焊缝超声检测方法基于脉冲回波原理, 将工件浸入水中, 采用高频探头进行水浸式检测, 通过对反射信号进行人工分析来评价焊接质量^[17-18]。由于超声束具有一定的尺寸, 在焊缝边缘的传播过程存在半返半透现象, 一般采用 6 dB 法对焊缝边缘进行判定, 即当超声波的回波幅值为母材区回波幅值的一半时, 其声衰减度为 6 dB, 此时判定超声束的中心线与焊缝边缘重合。但是, 在实际的检测中发现, 采用 6 dB 法在点焊、激光焊等接头的边界判定中存在一定的偏差, 而随着对焊缝检测精度要求的不断提高, 传统的 6 dB 法检测结果已经不能满足要求。鉴于超声数值模拟能够直接观察超声波的传播规律^[19-22], 本文采用 COM-SOL Multiphysics 有限元分析软件, 建立了搭接激光焊接头的仿真模型, 对焊接接头内部各个区域

超声波的传播规律进行了分析, 对传统 6 dB 法的检测误差形成原因进行了分析, 并形成了基于修正 6 dB 法的搭接激光焊接头的熔宽评估方法, 为激光焊接头的质量评估提供了理论基础和试验方法。

2 激光焊接头超声检测仿真分析

2.1 激光焊接头的结构特点

为了建立符合焊接接头实际情况的有限元分析模型, 本文采用板厚组合为 1 mm+2 mm 的 SUS301L 奥氏体不锈钢薄板制备了非熔透型激光焊搭接接头, 对接头的金相结构进行了分析。接头形式和基本结构如图 1 所示。

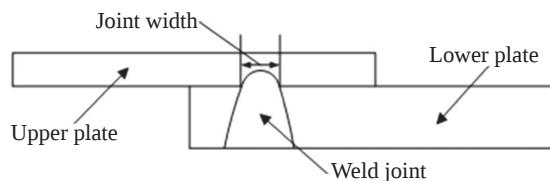


图 1 激光焊接头结构图

Fig. 1 Structure of the laser welding joint

将激光焊接头沿垂直于焊缝方向剖切, 制备成激光焊接头的金相样件, 以观察激光焊接头的宏观形貌, 其结果如图 2 所示。由图 2 可知, 激光焊接头的熔合区边缘为长条状的柱状晶, 而接头中心区域晶粒细小, 熔合区与母材区存在一定的组织差异, 具有明显的熔合线, 热影响区较小。虽然熔合线明显, 但是熔合线两侧的主要成分仍然为不锈钢, 声阻抗差异较小, 因此熔合线并不能成为声学上的强反射界面。在熔合区外侧, 上下钢板的界面明显, 钢板与间隙中的空气存在较大的声阻抗差异, 因此上、下钢板的表面均为强反射界面。

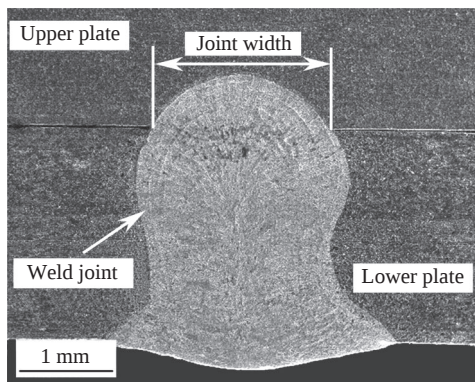


图 2 激光焊接头截面金相图

Fig. 2 The metallographic section of the laser welding joint

2.2 有限元模型的建立

根据激光焊接头的结构特点,建立了垂直于焊缝方向的剖面有限元分析模型,其几何结构及边界条件设置如图 3 所示。由图 3(a)可见,模型采用 1 mm+2 mm 的板厚组合,剖面宽度设置为 10 mm。在上下层钢板的交接处设置了宽度为 W 的连接区域,以模拟焊接接头的连接宽度。根据模型的需要,宽度值 W 分别设置为 0.5, 1, 1.5 和 2 mm。模型上表面中的 $S_1 \sim S_5$ 代表入射超声束的中心位置,其中 S_1 和 S_5 分别为扫描起始点和扫描结束点; S_2 和 S_4 分别代表左侧和右侧接头边缘扫描点; S_3 代表接头中心位置的扫描点。在超声检测模拟时,超声束中心由 S_1 向 S_5 逐步移动,步距设置为 0.04 mm。

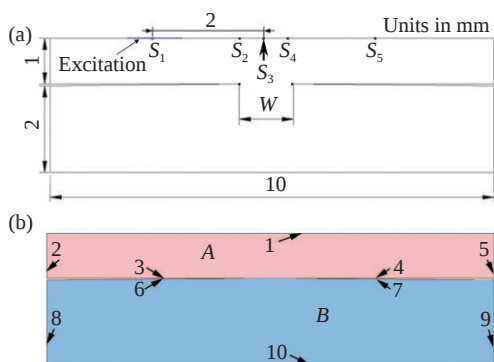


图 3 激光焊接头的截面模型。(a)结构及尺寸;(b)求解域设置

Fig. 3 Section model of the laser welding joint. (a) Structure and dimensions; (b) solution domain setting

由图 3(b)可见,求解域分成 A、B 两部分,分别代表两层不锈钢板。虽然模型宽度设置为 10 mm,但是实际接头尺寸远大于 10 mm,求解域中的边界 2, 5, 8, 9 是为了简化计算而设置的人工

截断边界,因此将其设置为阻尼边界,其对超声束具有吸收作用。而边界 1, 3, 4, 6, 7, 10 则为钢板的外表面,设置为对超声波全反射界面。

在上板上表面施加超声激励信号,以模拟探头发出的超声波信号。激励信号采用 2.5 周期的正弦波叠加高斯窗,中心频率设置为 15 MHz,其波形如图 4 所示。激励信号施加到求解域的边界 1 上,宽度为 1 mm。

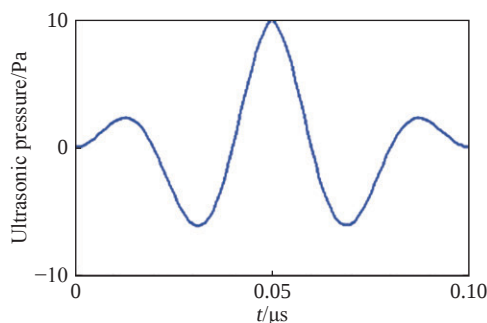


图 4 超声激励信号模型

Fig. 4 Ultrasonic excitation signal model

根据超声波在不锈钢中的声速,求出超声波在不锈钢中的波长为 0.42 mm。由于超声波波长远高于焊接接头中的晶粒尺寸,因此在处理波动问题时,并不在模型中设置熔合线、晶界等界面。为了兼顾运算精度及速度,单元网格最大尺寸一般控制在最小波长的 1/10~1/5 之间。本模型采用三角形单元划分,网格最大尺寸为 0.05 mm,网格模型如图 5 所示。模型总的单元数为 20586,自由度数目的 41769。根据不锈钢的材料参数,将杨氏模量 E 设置为 2.1×10^{11} Pa,泊松比设置为 0.33,材料密度 ρ 设置为 7850 kg/m^3 。采用迭代法进行求解计算,时间步长为 $0.001 \mu\text{s}$,总的目标求解时间为 $2.5 \mu\text{s}$ 。

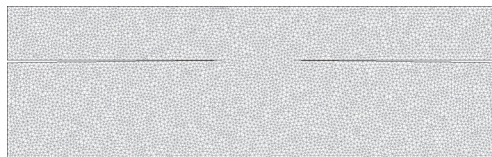


图 5 网格划分

Fig. 5 Mesh generation

2.3 仿真结果分析

2.3.1 焊接接头各区域的超声传播状态分析

当超声波在连接宽度为 1 mm 的激光焊接头的母材区入射时,其超声场分布如图 6(彩图见期

刊电子版)所示。由图6可见,当探头发射超声波后,超声波束向着与边界1垂直的方向传播,并在 $0.16\ \mu\text{s}$ 时到达上层钢板的下表面。由于在母材区,上下钢板具有明显间隙,超声波在上层钢板下表面完全反射,反射波在 $0.32\ \mu\text{s}$ 时回到上层钢板的上表面。根据超声波在钢板中的传播速度,当钢板的板厚为 $1\ \text{mm}$ 时, $15\ \text{MHz}$ 的超声波的传播时间为 $0.158\ \mu\text{s}$ 。仿真分析结果基本符合超声波的传播规律。在 $0.32\ \mu\text{s}$ 之后,超声波在上层钢板的上下表面发生多次反射,且由于超声波的反射和衰减作用,使声场强度逐渐降低。

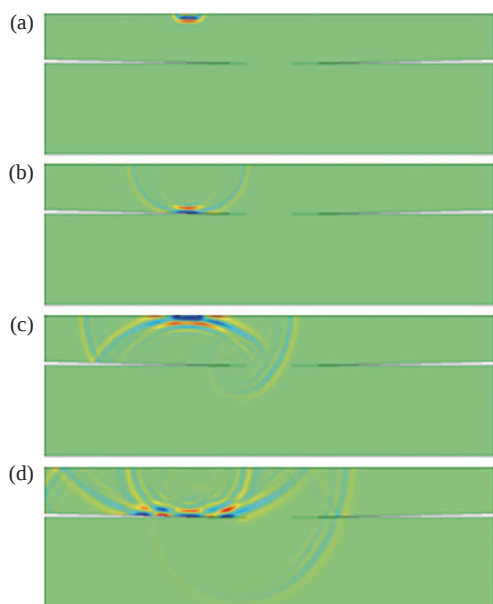


图6 母材区的超声场分布。(a) $t=0.02\ \mu\text{s}$; (b) $t=0.16\ \mu\text{s}$; (c) $t=0.32\ \mu\text{s}$; (d) $t=0.48\ \mu\text{s}$

Fig. 6 Ultrasonic distributions at the base metal zone. (a) $t=0.02\ \mu\text{s}$; (b) $t=0.16\ \mu\text{s}$; (c) $t=0.32\ \mu\text{s}$; (d) $t=0.48\ \mu\text{s}$

当超声波在母材与接头之间的过渡区入射时,其超声场分布如图7所示。超声波在 $0.16\ \mu\text{s}$ 时到达上层钢板下表面,这与母材区的入射情况一致。由于超声波束具有一定的尺寸,与母材区接触的部分超声波在当前位置反射,而另一部分与熔合区接触的超声波则继续向下层钢板传播,并在 $0.48\ \mu\text{s}$ 到达下层钢板的底面。值得注意的是,当超声波到达熔合区边缘时,声波在熔合区边缘处产生了尖端衍射,衍射波以熔合尖端为圆心向四周传播,对入射波和反射波均造成了一定影响。

当超声波在焊接接头的熔合区入射时,其超

声场分布如图8所示。在 $0.16\ \mu\text{s}$ 时超声波束到达上板底面,由于熔合区的上下钢板并无声阻抗差异大的界面,因此超声波束穿透焊缝金属,进入下层钢板。超声波束在 $0.48\ \mu\text{s}$ 时到达下层钢板下表面并被钢板下表面反射。由于超声波束在传播过程中宽度逐渐增加,在从下层钢板返回上层钢板时,在熔合区外的超声束被接触面反射,在熔合区内的超声束通过焊接接头,因此,返回上层钢板的超声波束强度降低。为了分析超声回波信号在不同连接区域的变化情况,提取了探头位于不同连接区时,接收到的超声A扫描信号,其结果如图9所示。由图9(a)可见,当探头位于母材区时,超声探头接收到两次从上板底面反射的回波,其回波的波形与入射波的波形基本一致,而幅值则逐渐降低,可见探头在母材区发射的超声波在工件中的传播过程不受焊缝影响,仅在上层钢板的表面发生镜面反射,超声波束的形状和方向均保持不变。

当超声探头位于接头边缘的过渡区时,超声A扫描信号如图9(b)所示,其上板底面的一次回波 $U1$ 和二次回波 $U2$ 出现的时间与母材区一致,但是幅值较母材区域低。这是由于部分超声束穿透焊接接头向下传播,导致超声束在上板底面的反射面积减小。在 $0.96\ \mu\text{s}$ 时,探头接收到了从下层钢板底面传回的一次回波 $L1$,其声程为上板底面回波 $U1$ 的3倍。由超声波的一般反射规律可知,当其他边界条件相同时,超声波的反射回波强度与反射面积成正比,因此可以通过 $6\ \text{dB}$ 法判定焊缝边界。而从图9(a)和图9(b)可知,虽然超声波在过渡区的反射面积仅为母材区反射面积的一半,但是其上板底面的一次回波强度由 5.8 下降到 2.66 ,其衰减度为 $6.77\ \text{dB}$,与传统的 $6\ \text{dB}$ 法具有一定差异。这是因为在熔合区边缘发生了尖端衍射,而衍射波作用到上板底面的反射波上,使反射波发生了轻微的偏转,导致探头接收到的一次回波 $U1$ 的幅值略低,这种偏转现象在图7(c)和图7(d)的有限元分析结果中可以明确观测到。由此可见,在检测过程中使用 $6\ \text{dB}$ 法确定的焊缝尺寸会略大于实际值,而采用 $6.77\ \text{dB}$ 的衰减度,则能准确定位焊缝边界。

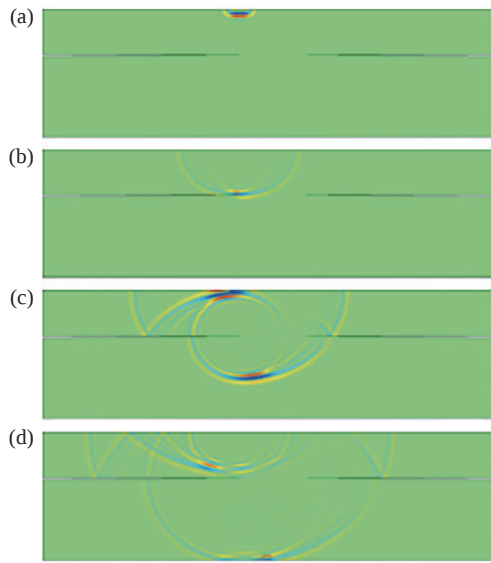


图 7 过渡区的超声场分布。(a) $t=0.02\ \mu\text{s}$; (b) $t=0.16\ \mu\text{s}$; (c) $t=0.32\ \mu\text{s}$; (d) $t=0.48\ \mu\text{s}$

Fig. 7 Ultrasonic distribution in the transitional zone. (a) $t=0.02\ \mu\text{s}$; (b) $t=0.16\ \mu\text{s}$; (c) $t=0.32\ \mu\text{s}$; (d) $t=0.48\ \mu\text{s}$

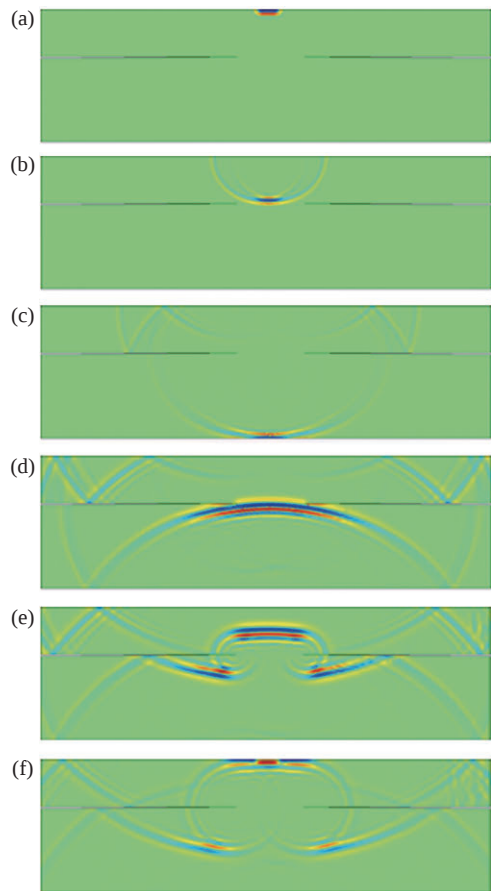


图 8 熔合区的超声场分布。(a) $t=0.02\ \mu\text{s}$; (b) $t=0.16\ \mu\text{s}$; (c) $t=0.48\ \mu\text{s}$; (d) $t=0.8\ \mu\text{s}$; (e) $t=0.88\ \mu\text{s}$; (f) $t=0.96\ \mu\text{s}$

Fig. 8 Ultrasonic distribution in the fusion zone. (a) $t=0.02\ \mu\text{s}$; (b) $t=0.16\ \mu\text{s}$; (c) $t=0.48\ \mu\text{s}$; (d) $t=0.8\ \mu\text{s}$; (e) $t=0.88\ \mu\text{s}$; (f) $t=0.96\ \mu\text{s}$

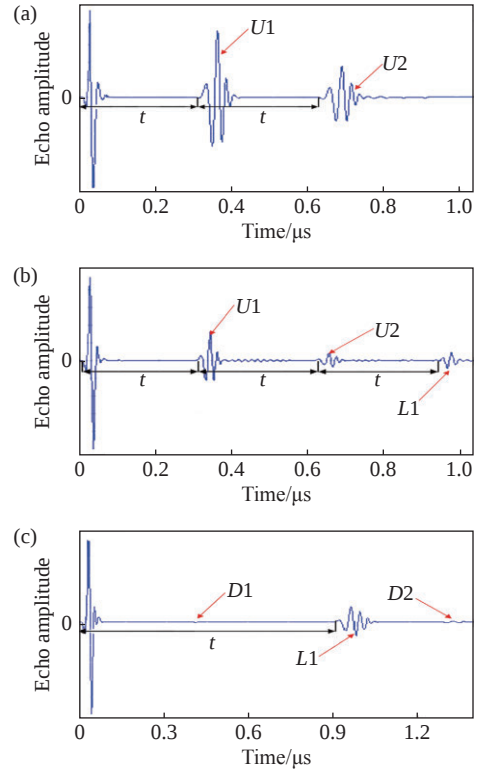


图 9 接头不同区域的超声 A 扫描信号。(a) 母材区; (b) 过渡区; (c) 熔合区

Fig. 9 Ultrasonic A-scan echoes from different connection zones. (a) Base metal zone; (b) transitional zone; (c) fusion zone

当超声探头位于焊接接头的熔合区时, 超声 A 扫描信号如图 9(c) 所示。图中上板底面回波 $U1$ 和 $U2$ 均消失, 仅在 $0.96\ \mu\text{s}$ 时出现了下板底面的一次回波。这是因为在熔合区, 上、下钢板之间的界面消失, 因此超声波束完全进入下层钢板, 在上板底面不再发生反射。另外, 在 $0.36\ \mu\text{s}$ 和 $1.3\ \mu\text{s}$ 时均出现了信号波动 $D1$ 和 $D2$, 这是探头接收到的接头边缘的尖端衍射波。其中, $D1$ 信号波动非常微弱, 这表明第一次尖端衍射波的信号很弱。在 $0.96\ \mu\text{s}$ 以后, 超声波发生二次入射时, 声束的扩散导致二次入射波的声束较宽, 因此在接头边缘的二次尖端衍射波能量更强, 使 $D2$ 信号的幅值略高。

由以上分析可见, 当超声波束在宽度为 $1\ \text{mm}$ 的激光焊缝的不同区域入射时, 一次回波幅值 $U1$ 具有明显的变化, 当超声波束的中心位置与焊缝边缘重合时, 一次回波 $U1$ 的衰减度为 $6.77\ \text{dB}$, 因此, 根据一次回波幅值可以对焊接接头的熔宽进行评估。

2.3.2 不同尺寸焊接接头的超声传播状态分析

为了分析超声波对不同尺寸接头的分辨率,

将有限元分析模型中的接头连接宽度分别设置为 0.5、1、1.5 和 2 mm, 并将超声波激励信号以 0.02 mm 的步长从母材区向熔合区逐步移动, 在每个步进点发射和接收超声回波信号。将超声 A 扫描信号中的一次回波 $U1$ 的幅值作为特征值, 形成接头横断面上的一次回波幅值变化图, 其结果如图 10(a) 所示。

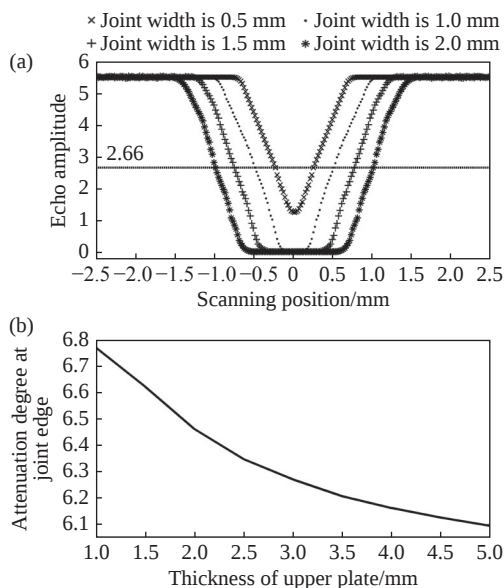


图 10 不同尺寸接头超声 A 扫描信号一次回波变化规律。(a) 不同熔宽尺寸接头 $U1$ 幅值变化规律; (b) 不同上板板厚 $U1$ 衰减度变化规律

Fig. 10 The change regularity of an ultrasonic A scan echoes at different joint dimensions. (a) $U1$ amplitude changes with different joint widths; (b) $U1$ attenuation degree changes with different upper plate thickness

由图 10(a) 可见, 当焊接接头宽度为 2 mm 时, 一次回波幅值在焊接接头横断面上呈现 U 字形, 接头两端母材区的幅值约为 5.5, 且在焊接接头两端 ± 1.5 mm 处开始下降, 这是由于宽度为 1 mm 的超声波束在此处首次移入到焊接接头边缘, 超声波束部分入射到接头中。在焊接接头的中心区域, 一次回波幅值接近于零。回波幅值在焊接接头两端的 ± 1 mm 处下降到 2.66; 当焊接接头尺寸为 1.5 mm 和 1 mm 时, 一次回波幅值依然呈现 U 字形, 回波幅值分别在接头两端的 ± 0.75 mm 和 ± 0.5 mm 处下降到 2.66; 当焊接接头尺寸为 0.5 mm 时, 一次回波幅值呈现 V 字形, 但是回波幅值在 ± 0.25 处下降到 2.66。这表明采用 6.77 dB

的衰减度在接头宽度为 0.5~2 mm 的变化范围内均能较为精确地反应出焊接接头的尺寸。

由以上分析可见, 对于搭接半熔透的激光焊接头, 采用 6.77 dB 作为阈值对传统的 6 dB 法进行修正, 可以提高焊接接头的尺寸分辨准确度。

为了分析板厚对一次回波幅值 $U1$ 的影响, 有限元分析模型中接头上板厚度设置为 1~5 mm (以 0.5 mm 为步长), 接头连接宽度均设置为 1 mm。在母材区和接头边缘分别发射和接收超声回波信号, 提取一次回波 $U1$ 的幅值, 计算一次回波幅值的衰减度, 其变化趋势如图 10(b) 所示。

由图 10(b) 可见, 当上板板厚增加时, 接头边缘一次回波 $U1$ 的衰减度具有明显的下降趋势。当上板板厚达到 5 mm 时, $U1$ 的衰减度已经趋向于 6.1 dB。这表明随着上板板厚增加, 在接头边缘产生的衍射波对一次回波的影响减小。这是因为随着上板板厚增加, 衍射波声程也相应增加, 衰减作用的影响更为明显。同时, 由于衍射波具有一定的偏转, 随着声程的增加, 衍射波逐渐偏离探头的接收范围。因此, 采用修正 6 dB 法定量测量接头熔宽时, 其修正值需要根据上板板厚进行调整。

3 激光焊接头超声检测试验结果与分析

为了验证修正 6 dB 法在实际激光焊接头中的尺寸测量精度, 选用 15 MHz 的高频聚焦探头对不同尺寸的激光焊接头进行垂直于焊缝方向的扫描检测, 扫描步距为 0.02 mm, 超声探头在每个扫描点发射和接收超声 A 扫描信号, 提取截面上各个不同区域的超声 A 扫描检测信号, 其结果如图 11(彩图见期刊电子版) 所示。

由图 11(a) 可见, 当超声波在母材区域入射时, 其一次回波在 0.32 μ s 时被超声探头接收, 二次回波与多次回波之间间隔均为 0.32 μ s, 说明在母材区接收到的回波均为上板底面的多次反射波。而当超声波在靠近母材侧的过渡区入射时, 如图 11(b) 所示, 其一次回波的幅值降低, 并且在 0.96 μ s 处出现了下板底面的一次回波。随着超声波入射位置向接头区域移动, 上板底面的一次回波幅值持续降低, 而下板底面的一次回波幅值

上升,如图 11(c)所示,上板底面的一次回波幅值已经降低到了噪声水平。而当超声束完全移动到接头区时,上板底面的一次回波消失,而下板底面一次回波上升到峰值。由以上分析可见,超声波在不同区域的回波情况与有限元分析结果基本一致。

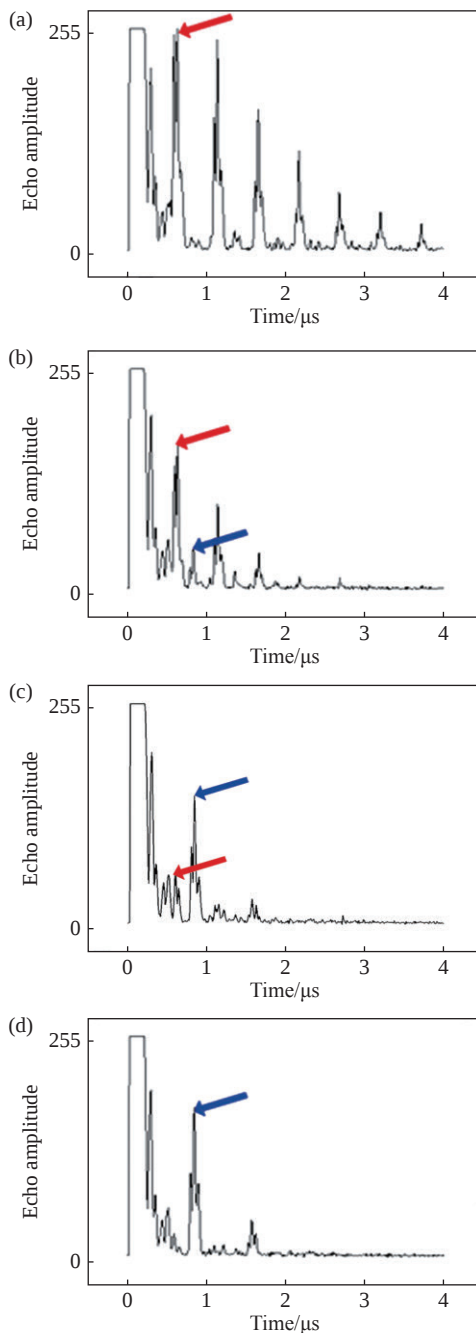


图 11 激光焊接头各区域超声 A 扫描信号。(a)母材区; (b)母材侧过渡区; (c)焊缝侧过渡区; (d)焊缝连接区
Fig. 11 Ultrasonic A-scan echoes from different zones of laser welding joints. (a) Base metal zone; (b) transition zone at the base metal side; (c) transition zone at the joint side; (d) fusion zone

以上板底面一次回波幅值 $U1$ 为特征值,形成激光焊接头截面上超声回波特征值变化曲线,其结果如图 12 所示。由图 12 可见,上板底面一次回波的幅值呈现两侧高,中间低的 U 形特征,与有限元分析的结果基本一致。

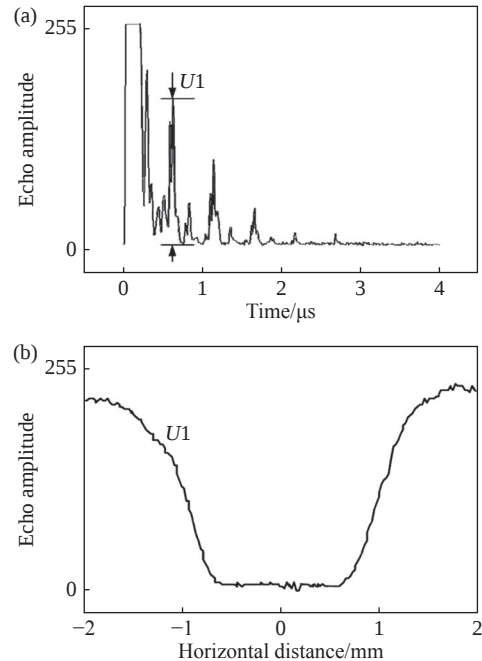
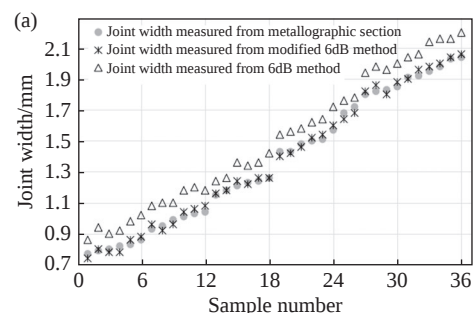


图 12 激光焊接头连接状态表征曲线。(a)特征量选取; (b)特征量变化规律

Fig. 12 Characteristic curve of the connection status of laser welding joints. (a) Characteristic parameter selection; (b) change regulation of the characteristic parameter

采用修正 6 dB 法测量 36 组激光焊接头的熔宽,并与金相截面上测量的熔宽进行对比,其结果如图 13 所示。当激光焊接头熔宽在 0.7~2.3 mm 范围内变化时,与金相截面的测量结果相比,传统 6 dB 法测量的激光焊接头熔宽均偏大,而基于修正 6 dB 法的测量结果则较为准确。



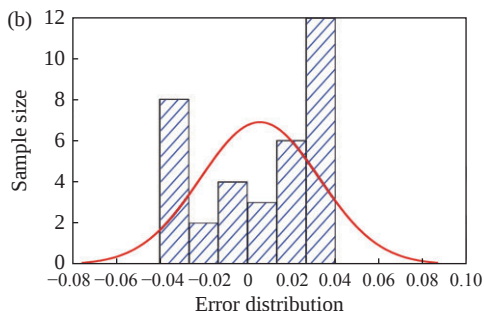


图 13 激光焊接头熔宽测量结果。(a)修正 6 dB 法、传统 6 dB 法和金相测量结果对比; (b)修正 6 dB 法的误差分布

Fig. 13 Results of joint width measured by different methods. (a) Comparison of detection results of the modified 6 dB method, traditional 6 dB method and metallographic section; (b) error distribution of modified 6 dB method

4 结 论

激光焊接头各个连接区域的超声波传播过程仿真结果表明,在超声波 A 扫描信号中,上板底

面一次回波 U_1 的幅值对接头各个区域的连接状态较为敏感;采用 U_1 的幅值作为特征值,能够有效地区分出焊接接头的母材区、过渡区和熔合区;由于接头边缘的尖端衍射效应, U_1 在接头边缘的衰减度为 6.77 dB。

不同连接尺寸的激光焊接头内部超声波传播过程的仿真结果表明,当上板板厚为 1 mm 时,基于接头边缘的 6.77 dB 的衰减度,可以较为准确地识别出不同尺寸的激光焊接头的熔宽。当上板板厚在 1~5 mm 之间变化时,接头边缘的衰减度从 6.77 dB 下降到 6.1 dB,根据衰减度变化曲线可以将传统 6 dB 法进行修正,对激光焊接头的熔宽进行精确评估。

不同激光焊接头的金相测量尺寸与超声检测尺寸对比表明,修正后的 6 dB 法在尺寸范围为 0.7~2.3 mm 的激光焊接头熔宽测量结果与金相测量结果吻合良好,表明本研究所建立的修正 6 dB 法具有较好的精度,为工程应用条件下激光搭接焊接头超声波检测熔宽提供了理论基础和实践方法。

参考文献:

- [1] LI Y A, LI Y F, WANG Q L, *et al.*. Measurement and defect detection of the weld bead based on online vision inspection[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(7): 1841-1849.
- [2] 韩晓辉, 陈静, 阙盈, 等. 不锈钢薄板非熔透激光搭接焊热源模型[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0502002.
HAN X H, CHEN J, KAN Y, *et al.*. Heat source model for non-penetration laser lap welding of stainless steel sheets[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0502002. (in Chinese)
- [3] CAO X, JAHAZI M, IMMARIGEON J P, *et al.*. A review of laser welding techniques for magnesium alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 171(2): 188-204.
- [4] LACKI P, ADAMUS K. Numerical simulation of the electron beam welding process[J]. *Computers & Structures*, 2011, 89(11-12): 977-985.
- [5] AI Y W, SHAO X Y, JIANG P, *et al.*. Process modeling and parameter optimization using radial basis function neural network and genetic algorithm for laser welding of dissimilar materials[J]. *Applied Physics A*, 2015, 121(2): 555-569.
- [6] 高向东, 李竹曼, 游德勇, 等. 激光焊匙孔特征的近红外与X射线传感分析[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 2400-2407.
GAO X D, LI ZH M, YOU D Y, *et al.*. Analysis of laser welding keyhole characteristics based on near-infrared high speed camera and X-ray sensing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10): 2400-2407. (in Chinese)
- [7] 陈玉华, 戈军委, 刘奋成, 等. TiNi形状记忆合金/钛合金异种材料激光焊[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2075-2080.
CHEN Y H, GE J W, LIU F CH, *et al.*. Micro laser welding of dissimilar materials between TiNi shape memory alloy and titanium alloy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2075-2080. (in Chinese)
- [8] 梁行, 阙盈, 姜云禄, 等. 不锈钢薄板激光搭接焊接头的力学性能[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0602001.
LIANG H, KAN Y, JIANG Y L, *et al.*. Mechanical properties of laser overlap welded joints of stainless steel sheets[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0602001. (in Chinese)
- [9] KUO T Y, LIN H C. Effects of pulse level of Nd-YAG laser on tensile properties and formability of laser weldments in

- automotive aluminum alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 416(1-2): 281-289.
- [10] 陈子琴, 高向东, 王琳. 大功率盘形激光焊焊缝背面宽度预测[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(9): 2524-2531.
CHEN Z Q, GAO X D, WANG L. Weld width prediction of weldment bottom surface in high-power disk laser welding[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(9): 2524-2531. (in Chinese)
- [11] 彭进, 李俐群, 张瑞珠, 等. 铝合金电弧预熔丝激光焊工艺特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(6): 061404.
PENG J, LI L Q, ZHANG R ZH, *et al.*. Study on aluminum alloy laser welding with pre-melted liquid filler by arc[J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2017, 54(6): 061404. (in Chinese)
- [12] 黄怡洁, 高向东, 林少锋. 激光焊接参数对有机玻璃与不锈钢接头力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1202006.
HUANG Y J, GAO X D, LIN SH D. Influences of laser welding parameters on mechanical properties of polymethyl methacrylate and stainless-steel joints[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1202006. (in Chinese)
- [13] DITCHBURN R J, BURKE S K, SCALA C M. NDT of welds: state of the art[J]. *NDT & E International*, 1996, 29(2): 111-117.
- [14] MANSOUR T M. Ultrasonic inspection of spot welds in thin-gage steel[J]. *Materials Evaluation*, 1988, 46(5): 650-658.
- [15] LIU J, XU G CH, GU X P, *et al.*. Ultrasonic C-scan detection for stainless steel spot welds based on signal analysis in frequency domain[J]. *ISIJ International*, 2014, 54(8): 1876-1882.
- [16] CHERTOV A M, MAEV R G, SEVERIN F M. Acoustic microscopy of internal structure of resistance spot welds[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2007, 54(8): 1521-1529.
- [17] ZHOU G H, XU G CH, GU X P, *et al.*. Research on evaluating laser welding quality based on two-dimensional array ultrasonic probe[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 84(5): 1717-1723.
- [18] CHEN ZH H, SHI Y W, JIAO B Q, *et al.*. Ultrasonic nondestructive evaluation of spot welds for zinc-coated high strength steel sheet based on wavelet packet analysis[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(5): 2329-2337.
- [19] SONG Y K, HUA L, WANG X K, *et al.*. Research on the detection model and method for evaluating spot welding quality based on ultrasonic A-scan analysis[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2016, 35(1): 4.
- [20] NAKAHATA K, CHANG J J, TAKAHASHI M, *et al.*. Finite integration technique for coupled acoustic and elastic wave simulation and its application to noncontact ultrasonic testing[J]. *Acoustical Science and Technology*, 2014, 35(5): 260-268.
- [21] DELRUE S, VAN DEN ABEELE K, BLOMME E, *et al.*. Two-dimensional simulation of the single-sided air-coupled ultrasonic pitch-catch technique for non-destructive testing[J]. *Ultrasonics*, 2010, 50(2): 188-196.
- [22] BAEK E, YIM H. Numerical modeling and simulation for ultrasonic inspection of anisotropic austenitic welds using the mass-spring lattice model[J]. *NDT & E International*, 2011, 44(7): 571-582.

作者简介:



黄治轶(1974—), 男, 辽宁沈阳人, 硕士, 教授级高级工程师, 2005 年于吉林大学材料加工工程专业获得硕士学位, 现为中车长客轨道车辆股份有限公司工艺规划经理, 主要从事轨道车辆车体焊装工艺开发以及焊接质量控制和检测技术方面的研究。E-mail: hzy77151145@126.com



董娟(1983—), 女, 四川宜宾人, 博士, 工程师, 2019 年 7 月于吉林大学获得博士学位, 现为吉林大学材料科学与工程学院职工, 主要从事焊接接头的质量控制与检测方面的研究。E-mail: dongjuan@jlu.edu.cn