

# 轨道交通车辆不锈钢车体激光焊缝 定量超声波检测与评价研究

周广浩<sup>1</sup> 李冰<sup>1</sup> 杜雨欣<sup>1</sup> 唱晓宇<sup>1</sup> 高忠良<sup>2</sup> 康丽齐<sup>1</sup> 高雅<sup>1</sup>

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司工程技术中心, 130062, 长春;

2. 中车长春轨道客车股份有限公司质量保证部, 130062, 长春)

**摘要** [目的]在轨道交通车辆不锈钢车体的激光焊接过程中,激光束向材料传递能量的过程是动态变化的。为保证激光焊接质量,需要利用无损检测方法来评估不锈钢车体激光焊缝的熔合状态。为此,应对基于超声波定量检测技术的激光焊缝融合状态检测方法进行深入研究。[方法]介绍了试验的材料及试验的相关准备工作,开展了超声波检测试验。在时域上,对A扫描信号进行提取分析;在频域上,利用快速傅里叶方法对A扫描信号进行了时频域转换,制作出频谱特性曲线。利用时域上的A扫描信号和频域上的频率谱特性曲线,建立了激光焊缝熔合宽度(以下简称“熔宽”)的计算模型。采用半衰减法和频域分析法获得熔宽的仿真值,将仿真值与实际值进行对比,并进行了误差统计分析。[结果及结论]超声波A扫描信号和主频幅值的变化与探头位置有良好的对应关系。采用半衰减法和频域分析法获得的熔宽均具有有效性,可用来对焊缝质量进行有效评估。与半衰减法相比,频域分析法具有更高的准确性和稳定性,其熔宽仿真值与实际值的误差在0.1 mm以内,该检测精度能够满足实际工程应用的检测需要。

**关键词** 轨道交通车辆;激光焊缝;熔合状态;超声波检测技术;A扫描信号;熔合宽度

中图分类号 U270.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.012

## Quantitative Ultrasonic Testing and Evaluation of Laser Welds for Stainless Steel Carbody of Rail Transit Vehicles

ZHOU Guanghao<sup>1</sup>, LI Bing<sup>1</sup>, DU Yuxin<sup>1</sup>, CHANG Xiaoyu<sup>1</sup>, GAO Zhongliang<sup>2</sup>, KANG Liqi<sup>1</sup>, GAO Ya<sup>1</sup>

(1. Engineering Technology Center, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. Quality Assurance Department, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

**Abstract** [Objective] During the laser welding process of stainless steel carbody of rail transit vehicles, energy transfer

from the laser beam to the material is dynamically variable. To ensure the quality of laser welding, non-destructive testing methods are required to evaluate the fusion state of the laser welds in stainless steel carbodies. Thus, the laser weld fusion state detection method based on quantitative ultrasonic testing technology is investigated. [Method] Materials and preparatory work for the experiments are introduced, and ultrasonic testing experiments are conducted. In the time domain, A-scan signals are extracted and analyzed. In the frequency domain, the FFT (fast Fourier transform) method is used to convert A-scan signals into the time-frequency domain, producing spectral characteristic curves. Using the A-scan signals in the time domain and the spectral characteristic curves in the frequency domain, a calculation model for the fusion width of the laser weld (hereinafter referred to as 'fusion width') is established. The semi-attenuation method and frequency domain analysis method are used to obtain the simulated values of the fusion width, which are then compared with actual values, followed by the error statistical analysis. [Result & Conclusion] The variations in ultrasonic A-scan signals and main frequency amplitude correlate well with the probe position. The fusion widths obtained using the semi-attenuation method and frequency domain analysis method are both valid for assessing weld quality effectively. Compared to the semi-attenuation method, the frequency domain analysis method demonstrates higher accuracy and stability, with the detected error between the simulated fusion width and the actual value within 0.1 mm. This precision meets the requirements for practical engineering applications.

**Key words** rail transit vehicle; laser weld; fusion state; ultrasonic testing technology; A-scan signal; fusion width

轨道交通车辆不锈钢车体(以下简称“不锈钢车体”)具有轻量化、抗腐蚀性、高安全性及环保性等优点。传统的不锈钢车体大多采用电阻点焊方式进行组装,该方式下不锈钢车体表面往往会出现肉眼可见的凹痕,影响车体的外观及气密性。

近年来,激光焊接在轨道交通车辆车体制造中逐渐成为优势<sup>[1-2]</sup>。但在激光焊接过程中,激光束向材料传递能量的过程是一个高度动态变化的过程,且能量传递易受外界干扰因素的影响,进而导致能量传递不稳定,因此,找到一种有效的方法来评估激光焊接的质量具有重要意义<sup>[3]</sup>。在轨道交通车辆车体的制造过程中,激光焊接主要采用搭接接头,焊缝的形成需要 2 块钢板在界面处熔合,焊缝的熔合宽度(以下简称“熔宽”)是评估焊缝质量的重要参数,其与激光焊接的其他参数相结合,可综合评估激光焊接的焊缝质量,因此,对激光焊缝熔宽的准确评估至关重要<sup>[4]</sup>。

对于激光焊接而言,破坏性检测不仅效率低下,还会导致材料浪费,因此,对激光焊缝进行无损检测显得尤为重要。超声波检测技术具有高可靠性、高安全性、高效率等特点,是激光焊缝无损检测的最佳选择<sup>[5]</sup>。同时,由于母材和熔合区的超声波信号具有不同的特性,可以通过提取不同的特征值来确定熔宽。为此,为保证激光焊接接头的质量,本文针对不锈钢车体的实际生产需求,采用超声波无损检测技术对熔宽进行准确评估,并通过超声波的 A 扫描(即将接收到的超声信号处理成波形图像)得到对应的频率谱特性曲线,由此检测出熔宽,进而对激光焊缝质量进行评估<sup>[6]</sup>。

## 1 试验材料及试验准备

### 1.1 试件制备

采用激光焊接方式时,不锈钢车体主要使用 0.5~4.0 mm 厚的板材。不锈钢车体激光焊接采用搭接接头和半熔透方式,如图 1 所示。不锈钢蒙皮覆盖在骨架外部,激光束从骨架一侧焊接。骨架和蒙皮的厚度分别为 1.0 mm 和 1.2 mm,采用 Nd:YAG 型激光器进行焊接。通过控制激光功率,可以获得 24 种不同类型的焊缝(焊缝长度均为 100 mm)。

### 1.2 检测设备

本文使用的超声波检测设备由 1 个 15 MHz 聚焦超声波探头、1 个 100 MHz 超声波采集卡、1 个机械扫描平台及 1 台便携式工业计算机组成。超声波扫描按照工业计算机设定的程序自动进行,扫描精度高达 0.02 mm。在扫描过程中,超声波探头可以在电机步进后收集数据,最终获得 1 个反映超声波

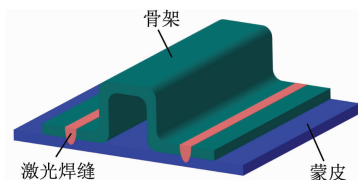


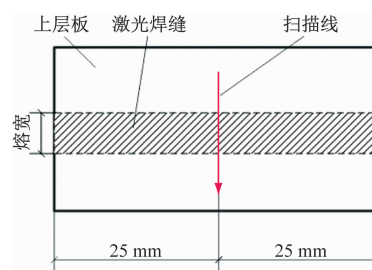
图 1 不锈钢车体激光焊接头示意图

Fig. 1 Diagram of laser welded joint in stainless steel vehicle carbodies

检测信号特征的二维 A 扫描数据矩阵。将矩阵数据存储在计算机中,用于后续分析。考虑到实际工业环境中噪声的影响,整个扫描设备须放置在封闭空间内,以确保检测的准确性。

### 1.3 试验方法

为避免焊缝余高对超声波扫描过程的影响,选择蒙皮一侧(将该侧定义为“上层板”)作为扫描平面。超声波探头扫描路径如图 2 所示。

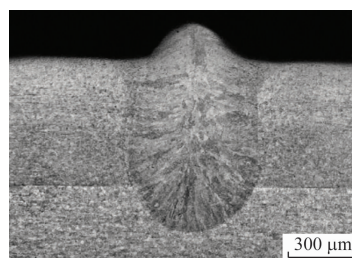


注:箭头表示扫描检查的方向。

图 2 超声波探头扫描路径示意图

Fig. 2 Diagram of ultrasonic probe scanning path

对焊缝进行横向扫描检测时,扫描步长设为 0.02 mm,扫描点数(即电机步进次数)为 200 个,扫描数据用于对熔宽进行评估。为了验证熔宽评估的准确性,沿扫描线对 24 组焊缝进行切割加工,并预留了一定裕量用于砂纸打磨。将 24 组试件抛光和腐蚀后,在光学显微镜下观察试件,测量试件的熔宽实际值,并将试件按照实测值由小到大的排列方式进行编号。焊缝横截面的宏观形貌如图 3 所示。



注:300 μm 为标尺的比例尺寸。

图 3 焊缝横截面的宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic morphology of weld cross-section

## 2 试验结果分析

### 2.1 时域和频域分析

图4为图2扫描线上不同位置的超声波A扫描图。图4中:横轴的“采样点数”为超声波采集卡采集得到的数据量; $A_m$ 为上层板底面一次反射回波幅值的最大值。

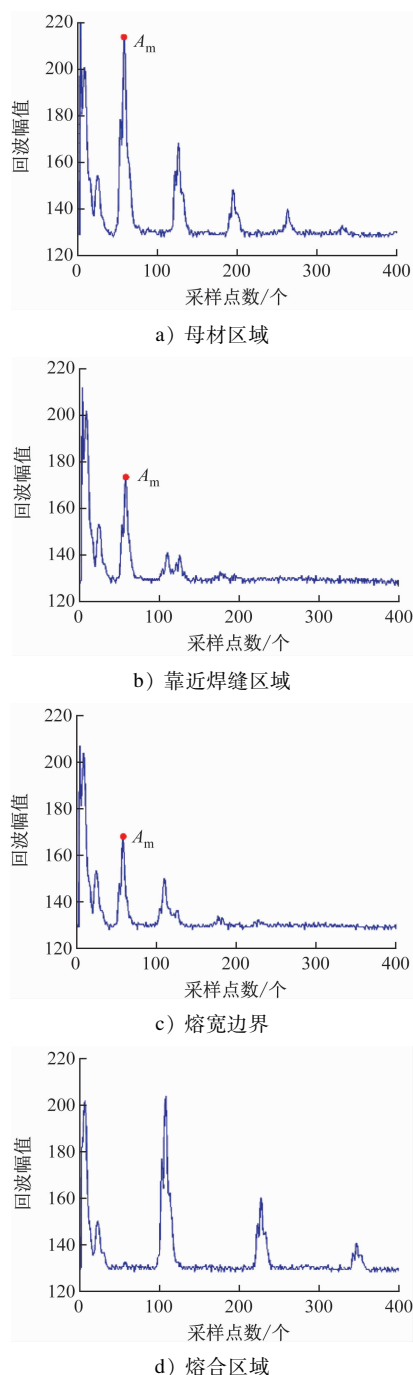


图4 激光焊缝不同位置的超声波A扫描图

Fig. 4 Ultrasonic A-scan charts in different positions of the laser weld

图5为图4经过FFT(快速傅里叶变换)后的频谱特性曲线。

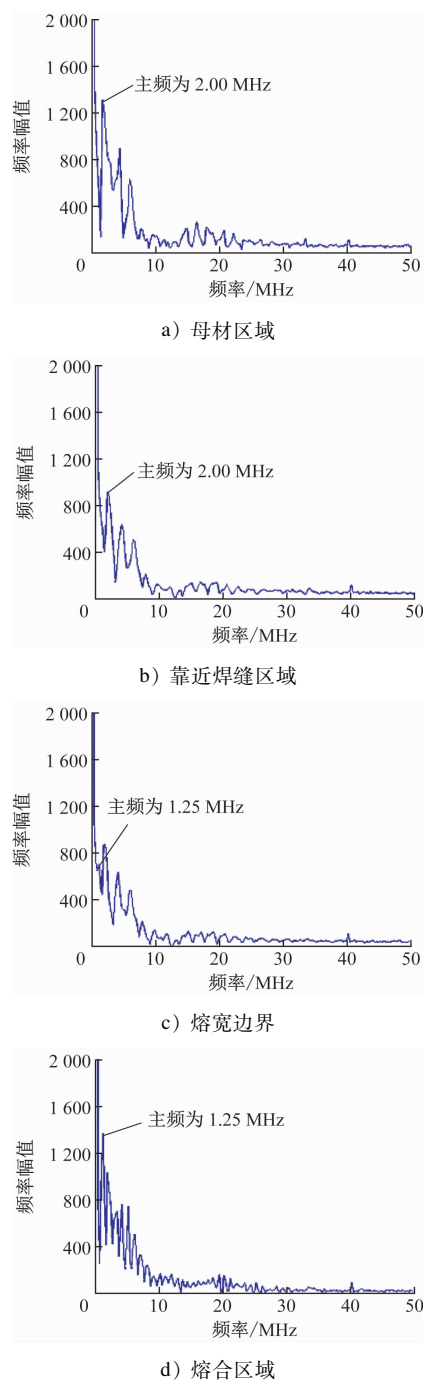


图5 对图4进行快速傅里叶变换后的频谱特性曲线

Fig. 5 Spectrum characteristic curves after FFT of curves in Fig. 4

由图4、图5可知:

1) 当探头位于母材区域时,回波幅值达到最大值 $A_m$ ,如图4 a)所示。此时在图5 a)对应的频率谱特性曲线中,主频(产生极大幅值时对应的频率)为

2.00 MHz。

2) 当探头靠近熔宽的边界时,声波的一小部分穿过焊缝传播,导致图 4 b) 中的回波幅值和图 5 b) 中主频对应的幅值降低。

3) 随着探头到达熔宽边界时,图 4 c) 中的回波幅值进一步降低。在相应的频率谱(即图 5 c))中,出现了一个新的主频极大值,此时对应的主频为 1.25 MHz。

4) 当探头位于熔合区域时,图 4 d) 中上层板底面的一次反射回波消失,图 5 d) 中主频为 1.25 MHz 对应的幅值达到最高。

以上分析表明,回波幅值、主频的变化均与探头的位置相关。通过对频谱特性曲线的分析,当探头在焊缝边界时,出现了一个新的主频,且随着探头逐步接近熔合区域,该新主频对应的幅值逐渐增大。这是因为熔合区域的晶粒尺寸远大于母材区域,探头进入熔合区域后,图 4 c) 的回波数量减少,声波衰减增大。与母材区域频谱特性曲线(即图 5 a))相比,熔合区域频谱特性曲线(即图 5 c))的整体频率幅值较低,且随着传播距离和晶粒尺寸的增大,高频分量比低频分量衰减得更快。因此,回波幅值、主频的特性可以用于准确评估激光焊缝的熔宽。

## 2.2 熔宽评估

在超声波检测中,一般利用半衰减法来确定缺陷的边界。当探头位于缺陷中心上方时,缺陷的一次反射回波幅值达到最高。随着探头接近缺陷边缘,回波幅值会逐渐降低。当回波幅值降至缺陷中心回波幅值最高值的一半时,即可确定探头的位置为缺陷的边界位置,此时探头的中心正好位于缺陷边界上方。类似地,在本研究中,可以将熔宽的边界视为缺陷边界。

图 6 为探头沿图 2 扫描线扫描过程中  $A_m$  的变化曲线。由图 6 可知:随着探头从母材区域向熔合区域移动, $A_m$  逐渐降低。当  $A_m$  降低到母材区域最大回波幅值的一半时,即可确定焊缝边界的位置。

图 7 为探头沿图 2 扫描线扫描过程中 1.25 MHz 频率对应的幅值变化曲线。由图 7 可知:在母材区域,1.25 MHz 频率对应的幅值保持在一个稳定的水平;当探头移动到焊缝边界时,其幅值急剧增加。由此可以推断,主频的出现与焊缝边界有很好的对应关系。不过,该推断还需进一步试验验证。

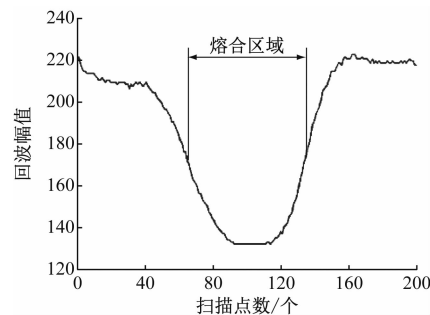


图 6 扫描过程中  $A_m$  的变化曲线

Fig. 6 Change curve of  $A_m$  during the scan

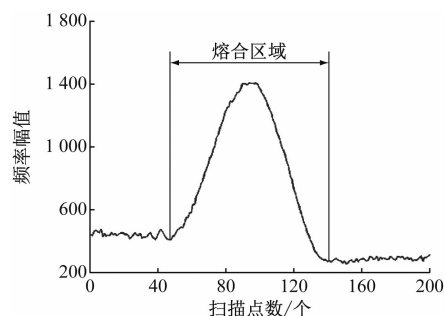


图 7 扫描过程中 1.25 MHz 频率对应的幅值变化曲线

Fig. 7 Change curve of the amplitude corresponding to the 1.25 MHz frequency during the scan

## 2.3 试验验证

本文选取半衰减法、频域分析法并进行了仿真试验,以进一步验证主频及焊缝边界的对应关系。图 8 为利用半衰减法获得的熔宽仿真值。图 9 为利用频域分析法获得的熔宽仿真值。将 2 种试验方法得到的仿真值与实际值进行对比,并进一步对仿真值进行相对误差统计。

1) 图 8 a)、图 9 a) 分别为利用半衰减法、频域分析法得到的熔宽仿真值与实际值对比结果。随着熔宽的增加,其仿真值与实际值均呈上升趋势。当熔宽小于 1 mm 时,使用半衰减法得到的仿真值误差较大。这是因为探头晶片及延迟块的直径大于熔宽,当探头位于一侧边界时,超声波受到焊缝另一侧边界的干扰,从而导致误差增大。从整体数值分析来看,利用频域分析法得到的仿真值较半衰减法误差更小。

2) 图 8 b) 和图 9 b) 分别为利用半衰减法和频域分析法得到的熔宽仿真值与实际值对比后的相对误差统计图。其中,利用半衰减法得到的熔宽相对误差均值和标准差分别为 0.029 53 和 0.215 19,利用频域分析法得到的熔宽相对误差均值和标准差分别为 0.010 04 和 0.092 41。利用频域分析法



得到相对误差在 0.1 mm 以内的数量明显增加。频域分析法得到的正态分布相对误差均值和标准差均小于半衰减法,这意味着频域分析法得到的仿真

值具有更高的准确性和稳定性,这也为熔宽的准确评估提供了重要依据。

### 3 结语

1) 超声波 A 扫描图和频谱特性曲线结果表明,上层板底面一次反射回波幅值的最大值  $A_m$ 、主频的特性均与探头的位置有关。

2) 激光焊缝熔宽可利用半衰减法和频域分析法进行评估。通过试验验证,与熔宽的实际值相比,使用半衰减法得到的仿真值误差较大。频域分析法是确定熔宽的最佳方法。

3) 从误差统计分析角度看,利用频域分析法获得的大多数仿真值与实际值的相对误差在 0.1 mm 以内,该检测精度能够满足实际工程应用的检测需要。

### 参考文献

- [1] ZHOU G, XU G, GU X, 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(5/6/7/8):1717.
- [2] ZHOU G, XU G, GU X, et al. Simulation and experimental study on the quality evaluation of laser welds based on ultrasonic test [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(9): 3897.
- [3] AO S, LUO Z, FENG M, et al. Simulation and experimental analysis of acoustic signal characteristics in laser welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1): 277.
- [4] ZHOU G, XU G, LIU J, et al. Assessment of laser weld width based on time and frequency domains of ultrasonic testing signals [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 251: 175.
- [5] XU H, LI Y, JIANG C. Quantitative ultrasonic detection and tensile-shear property prediction for laser welds of stainless steel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(1): 301.
- [6] LIU J, XU G, GU X, et al. Ultrasonic test of resistance spot welds based on wavelet package analysis[J]. Ultrasonics, 2015, 56: 557.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10  
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10  
· 通信作者:周广浩,高级工程师,zhouguanghao@163.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

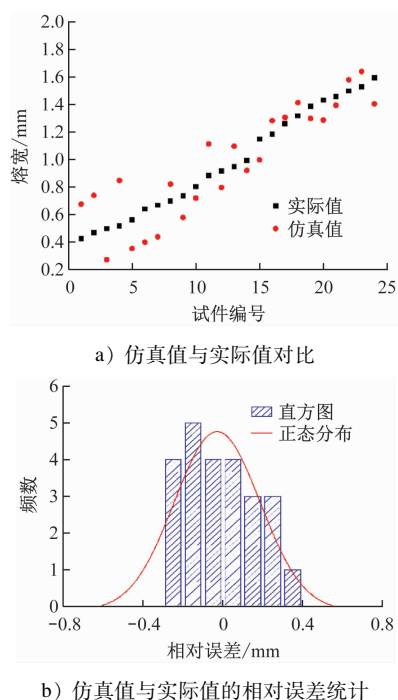


图8 利用半衰减法获得的熔宽仿真值

Fig. 8 Simulated fusion width values obtained by semi-attenuation method

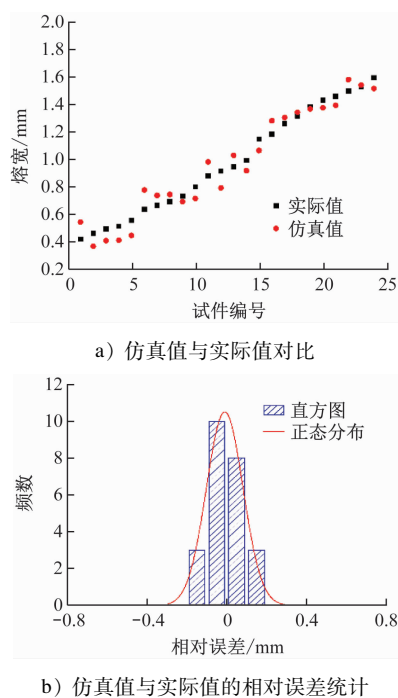


图9 利用频域分析法获得的熔宽仿真值

Fig. 9 Simulated fusion width values obtained by frequency domain analysis method