

基于熔宽的激光焊缝超声波检测成像分析

周广浩 程志义 张 勇 杜雨欣 陈 磊 毕浩棋 李 洋

(中车长春轨道客车股份有限公司质量保证部, 130062, 长春//第一作者, 高级工程师)

摘 要 利用超声波检测技术对不锈钢搭接焊缝质量进行了评估研究。使用二维阵列式探头对激光焊缝进行了检测, 分析了不同熔合区域对 A 扫描回波信号的影响, 并对熔合区域进行了 C 扫描成像。基于熔合特征信息提出了等效熔宽的概念, 利用统计方法建立了等效熔宽的数学计算模型。结果表明, 该模型的计算精度能够充分满足实际工程应用需要。

关键词 激光焊缝; 超声波检测成像; 熔宽

中图分类号 U213.9⁺3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.02.014

Ultrasonic Test Imaging Analysis of Laser Weld Based on Weld Width

ZHOU Guanghao, CHENG Zhiyi, ZHANG Yong, DU Yuxin, CHEN Lei, BI Haoqi, LI Yang

Abstract In this paper, ultrasonic testing technology is used to conduct an evaluation study of the stainless steel lap weld quality. The weld joint is inspected by 2D array ultrasonic probe, the effects of different fusion areas on A-scan echo signal are analyzed, and the fusion areas are imaged by C-scan. A concept of equivalent melting width is proposed according to the characterization of fusion state, and a computational model of equivalent melting width is established based on statistical method. Testing results show that the calculation accuracy of the model could completely meet the requirements of engineering application.

Key words laser weld; ultrasonic test imaging; melting width

Author's address Quality Assurance Department, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

激光焊接技术是薄板连接的一种经济有效的焊接方法, 广泛应用于汽车、轨道交通行业等^[1-3]。然而, 激光焊接是一个高度动态过程, 能量从激光束到板材极不稳定。因此, 研究一种有效评估激光焊缝质量的方法是非常必要的^[4]。

利用超声波无损检测技术可评估激光焊缝质量。对于传统的超声波检测方法, 作业人员通常使用单晶探头来分析回波幅值并判断焊缝质量。这种方法需要作业人员具备高技能水平, 但很难获取熔合区域的准确信息。分析研究表明, 激光焊缝熔宽能够用来表征激光焊缝质量。为此, 本文利用二维阵列式超声波探头对激光焊缝熔宽进行检测, 并对熔合区域进行 C 扫描成像, 从而建立一种基于熔宽快速评估激光焊缝质量的方法。

1 激光焊缝超声波检测技术

本文选用母材厚度分别为 1 mm 和 2 mm 的 SUS304 奥氏体不锈钢进行焊接试验, 焊接接头形式为搭接。采用 Nd:YAG 固体激光器进行激光焊接, 激光束照射于厚 1 mm 的板材表面。焊接热输入和照射区域、熔池形貌如图 1 所示。当熔深超过厚 1 mm 的板材时, 厚 2 mm 的板材开始熔化; 冷却后, 形成了焊接接头, 两层板材连接在一起。通过控制激光功率和焊接速度, 可获得不同种熔池形貌的焊接接头。

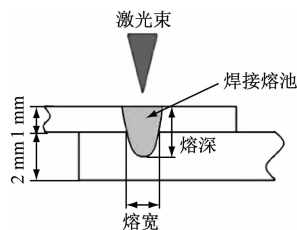


图 1 激光焊缝的熔池形貌

Fig. 1 Pool morphology of laser weld

利用二维阵列式探头对焊接接头进行超声波检测。检测时, 分别将焊缝长度和宽度方向定义为 X 向和 Y 向, 如图 2 所示。探头由 64 个阵元组成, 每个阵元尺寸为 0.4 mm(长度) × 0.4 mm(宽度), 阵元间隔为 0.1 mm, 可独立发射和接收超声波纵波信号。64 个阵元形成了 8 × 8 矩阵, 可覆盖 4 mm × 4 mm 的检测区域。

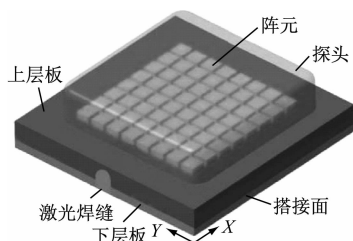


图2 激光焊缝超声波检测示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser weld ultrasonic detection

检测过程中,每个阵元依次激发和接收超声波信号。为避免阵元间的影响,同一时刻仅激发1个阵元。当所有阵元完成激发后,可采集到64组A扫描信号,每组信号可反映出搭接面处的熔合特征信息。通过处理信号,可构建出搭接面处的熔合特征图像。本文采用电子扫查替代了机械式扫查,检测效率明显提高(检测时间小于1 s)。

2 激光焊缝超声波检测结果分析

2.1 焊接接头 A 扫描图像分析

在不考虑焊接缺陷(如气孔、裂纹)的前提下,焊接接头强度与搭接面处的熔宽成线性关系。因此,熔宽可作为评估激光焊缝质量的重要特征参数。在检测过程中,由于每个阵元所处位置的熔合状态不同,所以阵元接收到的A扫描信号的特征也不同。因此,可将所有的特征信号提取出来,用于分析不同区域的熔合状态。

在激光焊缝焊接接头选取不同位置(见图3),进行A扫描,扫描图像见图4。根据超声波的传播特性,当阵元处于母材位置 Y_a 时,超声波信号在搭接面处发生反射;当阵元处于 Y_c 位置时,搭接面处的回波幅值大幅减小,究其原因这是由于搭接面随着母材的熔化而消失,超声波信号主要由下层板底面反射回波组成;当阵元处于 Y_b 位置时,超声波信号

主要由搭接面反射回波和下层板底面反射回波组成。根据回波信号特征,可从不同阵元接收到的信号中提取出搭接面反射回波幅值 A_m 。

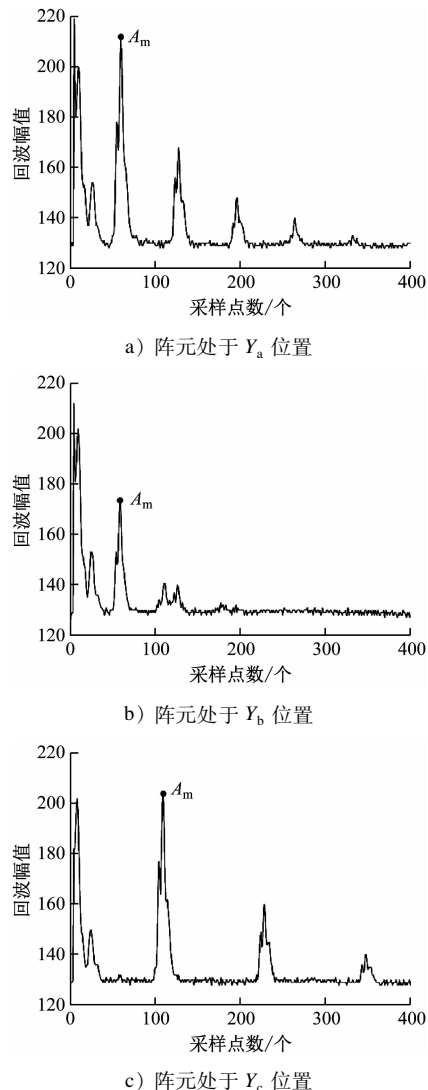


图4 不同位置阵元焊接接头的 A 扫描图像示意图

Fig.4 Welded joint A-scan image of array elements at different positions

2.2 焊接接头 C 扫描成像分析

由上述分析可知,搭接面处不同位置的回波信号幅值不同,可根据不同位置搭接面处的A扫描回波幅值 A_m 来构建C扫描图像。根据不同的回波幅值,利用灰度值构建C扫描图像,如图5所示。

由于阵元尺寸的限制,原始C扫描图像比较粗糙,获得的熔宽尺寸精度并不能满足实际工程应用要求,因此,可利用线性插值算法将图像进行优化,如图6所示。

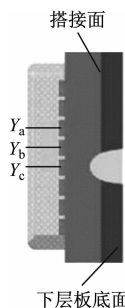
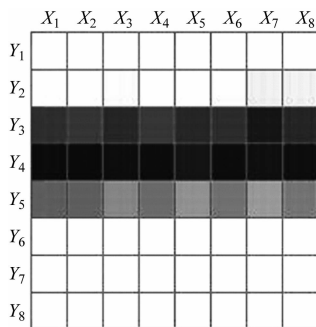


图3 阵元位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of array element position



注:白色、灰色和黑色单元格分别代表母材区域、过渡区域和完全熔合区域的特征。

图5 焊接接头的C扫描原始图像

Fig.5 Original C-scan image of welded joints

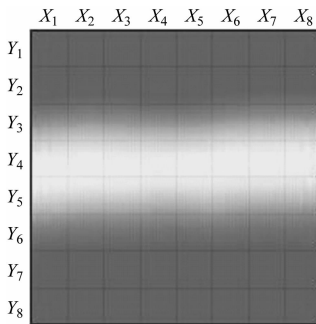
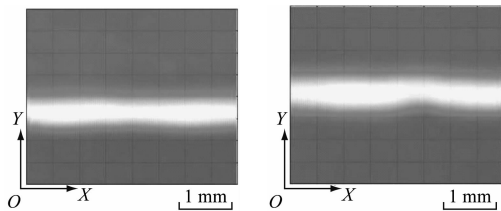


图6 插值优化后焊接接头的超声C扫描图像

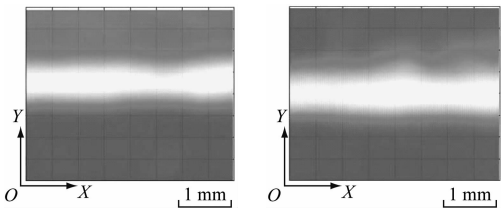
Fig.6 Ultrasonic C-scan image of welded joints after interpolation optimization

当焊接速度一定时,增加激光功率可加大焊接热输入。激光焊缝的熔宽和熔深随着热输入的增加而增加。热输入直接影响到熔池和焊缝形貌。利用C扫描成像方法可获得不同热输入的熔宽,如图7所示。由图7可见,搭接面处的熔宽随着激光



a) 激光功率为 1.0 kW

b) 激光功率为 1.5 kW



c) 激光功率为 2.0 kW

d) 激光功率为 3.0 kW

图7 不同激光功率下激光焊缝焊接接头的C扫描图像

Fig.7 C-scan images of welded joints under different laser powers

功率的增加而增加。由此可见,C扫描成像结果与激光焊接原理是一致的。

3 基于熔宽的激光焊缝焊接质量评价

3.1 等效熔宽的计算模型

由于激光功率、焊接速度等焊接参数的波动,焊缝中某个截面的熔宽值也存在一定的变化。因此,对整条激光焊缝焊接质量的评价显得尤为重要。本文提出了等效熔宽 D_e 的概念,用以表征整条焊缝的质量。

图8 a)为从不同阵元位置采集到的搭接面回波幅值特征图像。图8 a)中,特征图像分为高幅值区A、低幅值区C和过渡区B。其中,高幅值区A表示阵元位于非熔合区域,低幅值区域C表示阵元位于熔合区域;过渡区域B表示阵元的一部分位于熔合区域,而另一部分位于非熔合区域。将采集到的A扫描信号进行投影,形成一条V型曲线,该曲线包含了等效熔宽 D_e 的信息。为简化计算,可将该曲线近似成5条直线(见图8 b)):2条高幅值水平线OP和NM,2条斜线PH和KN,1条低幅值水平线HK。等效熔宽 D_e 为:

$$D_e = L_{HK} + kL_{PH} + kL_{KN}$$

式中:

L_{HK} 、 L_{PH} 、 L_{KN} ——分别为HK、PH和KN的长度;

k ——修正系数,根据6 dB法则, k 取0.5。

3.2 试验验证

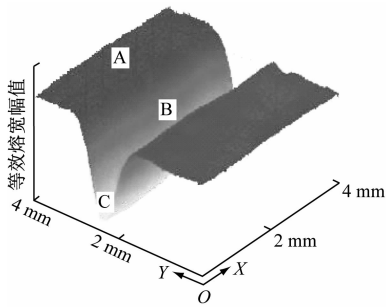
为验证等效熔宽计算模型,制作了对比试块(见图9)。对对比试块进行超声波检测,并计算等效熔宽。将 D_e 的计算值与实测值进行对比,如图10所示。由图10可见,等效熔宽的计算精度很高,误差小于0.05 mm,能够满足实际工程应用需求。

4 结论

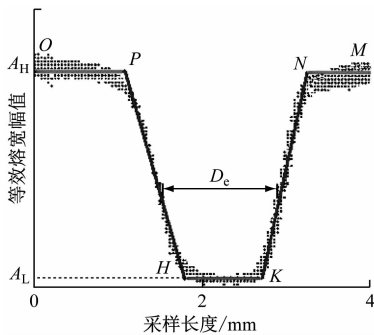
1) 通过对不锈钢激光焊搭接焊缝超声波扫描分析,搭接面处的回波幅值与探头阵元的位置有着良好的对应关系。

2) 根据不同的回波幅值可构建C扫描图像,并可通过插值算法将图像细化,以提高图像精度。

3) 基于C扫描图像,建立了等效熔宽的数学模型,且该模型的计算精度能够满足实际工程应用需求。



a) 搭界面回波幅值

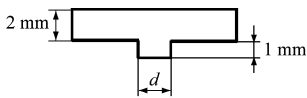


b) 等效熔宽

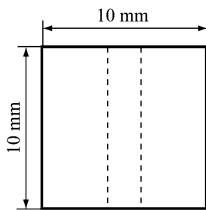
注: A_H 和 A_L 分别为等效熔宽的最高幅值和最低幅值。

图8 等效熔宽计算模型

Fig.8 Computational model of equivalent melting width



a) 主视图



b) 俯视图

注: d 为熔宽, 其值为 $0.8 \sim 2.4$ mm。

图9 对比试块示意图

Fig.9 Schematic diagram of reference blocks

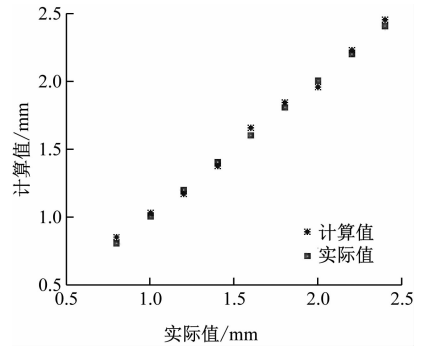


图10 等效熔宽的计算值与实测值对比

Fig.10 Comparison between calculated value and measured value of equivalent melting width

参考文献

- [1] 段珍珍, 张雪红, 谷晓鹏. 轨道车辆焊接制造工艺现状及发展趋势[J]. 焊接技术, 2011(11):1.
DUAN Zhenzhen, ZHANG Xuehong, GU Xiaopeng. Current situation and development trend of rail vehicle welding manufacturing technology[J]. Welding Technology, 2011(11):1.
- [2] 邱友胜. 列车提速对轨道车辆焊接技术的促进和发展[J]. 机械工人(热加工), 2007(11):17.
QIU Yousheng. Promotion and development of railway vehicle welding technology by increasing train speed[J]. Machinist Metal Forming, 2007(11):17.
- [3] 王春生, 刘庆祝. 焊接技术在轨道客车制造行业的推广应用[J]. 焊接, 2015(1):1.
WANG Chunsheng, LIU Qingzhu. Application of welding technology to manufacturing industry of railway vehicles[J]. Welding & Joining, 2015(1):1.
- [4] 王洪潇, 王春生, 何广忠, 等. 不锈钢轨道车辆侧墙激光焊快速装夹装置开发[J]. 金属加工(热加工), 2017(4):18.
WANG Hongxiao, WANG Chunsheng, HE Guangzhong, et al. Development of laser welding rapid clamping device for side wall of stainless steel rail vehicle[J]. MW Metal Forming, 2017(4):18.

(收稿日期:2021-09-28)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: tougao. umt1998. com