



基于超声信号增益补偿的电阻点焊熔核直径评估算法

吴刚¹, 关山月¹, 汪小凯^{2,3}, 王彬^{2,3}

(1. 三峡大学机械与动力学院, 湖北宜昌 443002; 2. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北武汉 430070; 3. 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 湖北武汉 430070)

摘要: 该文针对电阻点焊超声检测熔核直径评估算法中, 检测信号各波峰幅值不同程度衰减对熔核直径评估结果的影响, 提出一种基于小波变换超声信号增益补偿方法, 将原信号进行3层小波分解获得4个子带信号, 分别计算各子带信号衰减系数并补偿, 再通过小波重构得到重构信号, 最后利用重构信号计算熔核直径。通过构建点焊超声检测有限元仿真模型, 研究信号衰减对熔核直径计算结果的影响, 为试验提供理论依据。运用该方法处理多组点焊超声检测数据, 对比分析处理前后熔核直径计算值与金相实测值, 研究表明, 采用该方法处理超声信号并计算点焊熔核直径, 误差减小到0.1 mm, 可有效提高评估精度。

关键词: 电阻点焊; 超声检测; 增益补偿; 熔核直径

中图分类号: TG453.9

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2018)08-0013-07

Resistance spot welding nugget diameter estimation algorithm based on ultrasonic signal gain compensation

WU Gang¹, GUAN Shanyue¹, WANG Xiaokai^{2,3}, WANG Bin^{2,3}

(1. College of Mechanical and Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Modern Automotive Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components and Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In this paper, a method of ultrasonic signal gain compensation based on wavelet transformation is proposed, considering the influence of different attenuation degrees of all waves of test signals on the evaluation results of nugget diameter in the valuation algorithm for nugget diameter of resistance spot-welding. In this method, the original signal is decomposed by three layers to obtain four sub-band signals. The signal attenuation coefficient of each sub-band is calculated and compensated, and the reconstructed signal is obtained by wavelet reconstruction. Finally, the reconstructed signal is used to calculate the nugget diameter. The finite element simulation model of ultrasonic testing for spot welding was constructed to study the effect of signal attenuation on the calculation results of nugget diameter, providing a theoretical basis for the experiment. This method is applied to deal with multiple groups of spot welding ultrasonic testing data and provide a contrastive analysis of the calculated nugget diameter and metallographic measured value. The results show that the error can be reduced to 0.1 mm by using this method to process ultrasonic signals and calculate the nugget diameter of spot welding, which improves the evaluation accuracy.

Keywords: resistance spot welding; ultrasonic testing; gain compensation; nugget diameter

收稿日期: 2018-01-05; 收到修改稿日期: 2018-03-09

作者简介: 吴刚 (1978-), 男, 湖北汉川市人, 副教授, 博士, 研究方向为无损检测。

0 引言

电阻点焊广泛应用于汽车生产制造中,点焊质量是保证车身连接强度和安全性能的关键,而熔核直径是影响焊点连接强度最主要的因素^[1]。两层薄板通过点焊焊接后,点焊件可视为一种多层材料结构,各层材料的声阻抗不同,因而超声信号在传播过程中会发生不同程度衰减。由于焊核内部晶粒尺寸比母材大很多,其超声衰减也比母材更明显,导致检测信号波峰幅值不同程度减小,若直接利用原始信号波峰幅值进行熔核直径评估计算,会造成很大计算误差。

针对超声波衰减补偿,目前主要采用时间增益补偿技术^[2](TGC)对信号进行全局补偿,该方法忽略了频率对信号衰减的影响,补偿效果不理想。T Wang^[3]等人对超声波回波特性曲线进行补偿和校正,提出一种基于小波分解后超声波低频信号的回波幅度超声波扫描检测方法。许凯亮^[4]等人,提出了一种单一模式的频散补偿算法,解决了多模式导波频散问题,有助于超声导波多模式频散信号的分析。郭瑞鹏^[5]等人,提出了方差补偿、阈值补偿、余差补偿3种不同的校正方法,在超声相控阵检测中,均能有效提高缺陷的检测率和分辨率。

本文针对超声波衰减特性对点焊熔核直径计算误差的影响,采用小波分解与重构的方法,对超声信号各频段分别进行补偿,减小了点焊熔核直径计算误差,通过进行试验和仿真研究,验证了该补偿算法的有效性。

1 电阻点焊超声检测原理

电阻点焊超声检测原理如图1所示,熔核直径 d 小于探头晶片直径 D ,初始声波 P_0 在楔块底面的透射波一部分在上层板底面反射,另一部分在下层板底面反射,随着熔核直径的增加,上板底面反射回波幅值减小,下板底面反射回波幅值增加^[6]。假设不考虑结构的衍射作用及材料的吸收、散射作用,则上下底面回波幅值的大小反映熔核面积的大小,由此可推导熔核直径计算公式。

超声波在点焊件上的传播会发生以下界面反射:上层板上界面a、上层板下界面b、下层板下界面c; P_a 、 P_b 和 P_c 分别为界面a、b和c面反射回波幅值。当两层薄板厚度相等时, P_a 、 P_b 和 P_c 的反射延迟时间分别为 it_1 、 t_1+it_2 和 t_1+2it_2 (i 为声波反射的次数, t_1 为声波在楔块中往返的时间, t_2 为声波在单

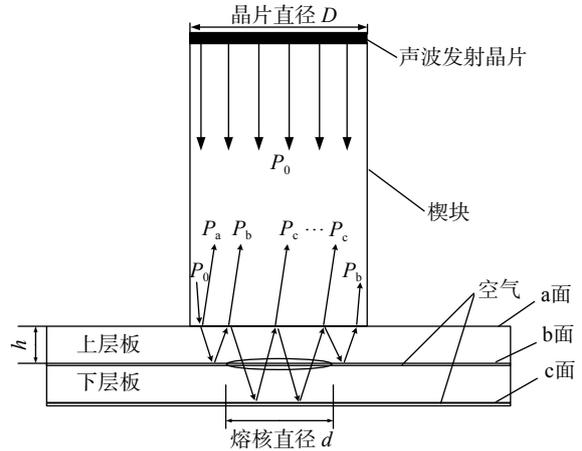


图1 电阻点焊超声检测原理图

层板中往返的时间)此时 P_{b2t} 和 P_{ci} 有相同的延迟时间,这意味着 P_{b2t} 和 P_{ci} 会叠加成一个波峰。探头最终接收到的声波信号理论波形图,如图2所示。

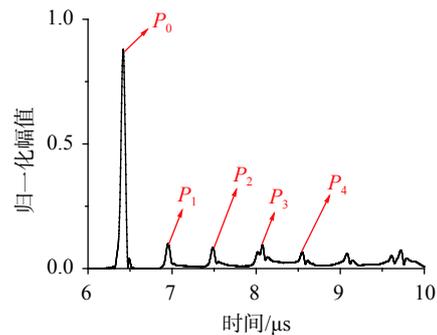


图2 点焊超声检测的理论A扫波形图

由图2可知, P_0 为a面反射回波声压值,而 P_b 是楔块与熔核面积差值的声波声压值, P_c 为超声透过熔核在底层反射回波声压值,故 P_c 值随熔核直径增大而增大。 P_1 即为b面反射回波声压值 P_b , P_2 则是 P_b 和 P_c 叠加的波峰幅值,那么熔核直径 d 的计算公式^[7]为

$$P_1 = P_b \quad (1)$$

$$P_2 = P_b + P_c \quad (2)$$

$$d = D / \sqrt{\frac{1}{P_2/P_1 - r_1} + 1} \quad (3)$$

式中: D ——超声探头晶片直径,mm;

r_1 ——声波从楔块底面传入到第一层板时的反射率,此处 $r_1=0.937$ 。

2 超声波衰减特性

点焊超声检测声波衰减主要为散射衰减和吸收衰减。在超声波传播过程中,超声波在穿过板层等

界面时,由于声阻抗不同发生散乱反射引起散射衰减;超声波在焊点内部晶粒界面散乱反射也会引起散射衰减。超声波在介质中传播时,由介质中质点间内摩擦和热传导引起超声波的衰减,称为吸收衰减^[8]。对于金属薄板点焊,焊核内部是铸态组织,其晶体组织比母材晶体组织粗大,因此超声波在焊核内的衰减比母材内部衰减更严重^[9]。

2.1 超声信号衰减方程

根据平面波在介质中的传播规律,超声信号衰减方程可用声压衰减方程^[10]表示为

$$P_x = P_0 e^{-\alpha x} \quad (4)$$

式中: P_x ——距波源距离为 x 处的声压, Pa;

P_0 ——波源的起始声压, Pa;

x ——至波源的距离, mm;

α ——介质衰减系数, NP/mm。

2.2 介质衰减系数

介质衰减包括吸收衰减和散射衰减,平面波不存在扩散衰减。由于介质衰减和反射损失,使底波高度依次减少,其介质衰减系数计算公式^[11]为

$$\alpha = -\frac{10}{(m-n)h} \lg \frac{P_m}{P_n} \quad (5)$$

式中: h ——单层板的厚度, mm;

P_m, P_n ——第 m, n 次底波幅值, Pa。

3 不同频段信号差异性补偿

超声波衰减主要与传播距离和信号频率有关,距离越大,频率越高,超声波衰减越大。对超声信号不同频率成分需要进行差异性补偿,获得更为准确的补偿信号。

3.1 超声信号补偿函数

根据超声波衰减原理,补偿是一个逆运算的过程,其补偿函数^[12]为

$$P'(x) = P(x) e^{\alpha x} \quad (6)$$

$$x = (Vt)/2 \quad (7)$$

式中: $P'(x)$ ——补偿后距离表面声压离散函数;

$P(x)$ ——补偿前声压离散函数;

V ——超声波在材料中的声速;

t ——回波峰值点采样时间。

3.2 超声信号小波分解

小波变换具有多分辨率功能,利用小波变换将原始信号分解成不同频率的子带信号,分别计算各子带信号衰减系数,并通过补偿函数进行补偿。sym 系小波是对 db 系小波的改进,比 db 小波具有更好的正交性和对称性,同时具备快速算法,可以将信号进行快速分解与重构^[13]。经过多次对比发现, sym8 小波基能够更好保留高频细节成分,因此本文选用 sym8 作为小波基。

某试块点焊超声检测信号如图 3 所示,利用 sym8 小波基对点焊检测原信号 $P(x)$ 进行 3 层小波变换,选取分解后第 3 层低频子带信号和 3 个高频子带信号进行逆向重构,得到重构信号 $S(x)$,如图 4 所示。原信号 $P(x)$ 经小波变换后分解为 a_3, d_1, d_2, d_3 等 4 个子带信号,如图 5 所示。

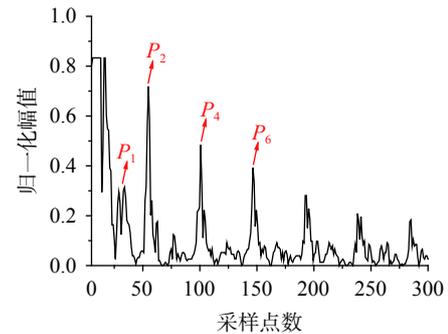


图3 点焊试块超声检测原信号

3.3 分段补偿与信号重构

根据式(5)计算衰减系数分别得到各子带信号的衰减系数,如表 1 所示,根据补偿函数(6)对各子带信号分别进行补偿,最后将补偿后的子带信号,利用小波变换重构得到重构信号,重构信号 $S(x)$ 如图 6 所示。

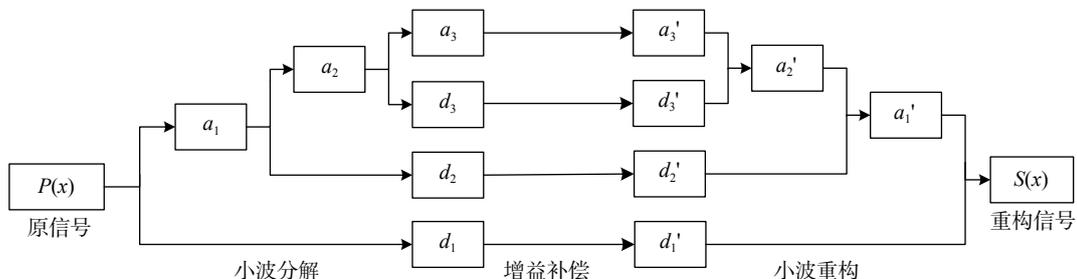


图4 小波分解与重构示意图

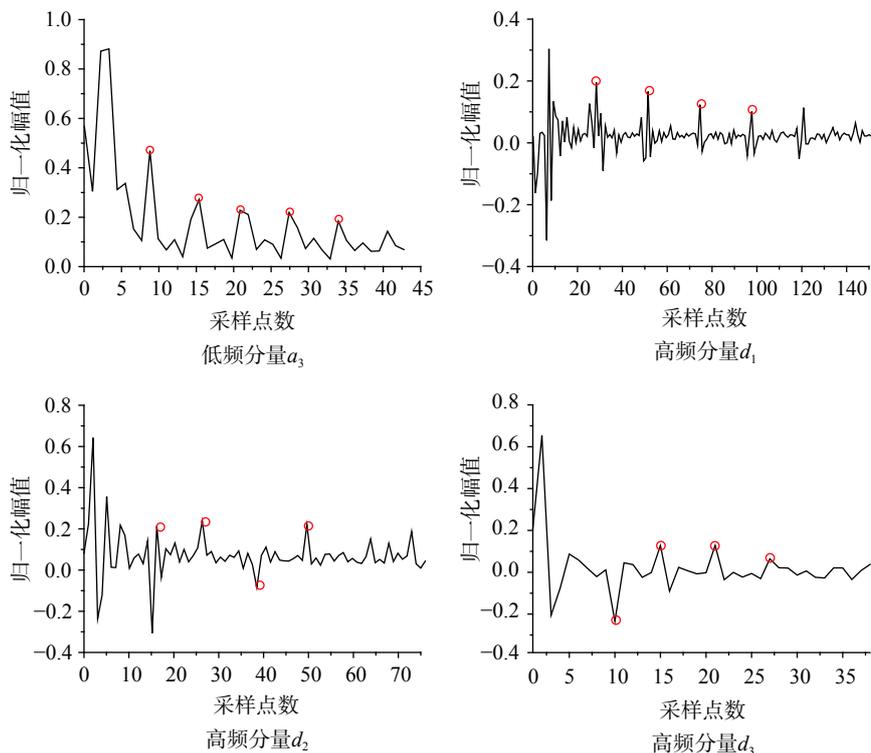


图5 小波分解子带信号

表1 各子带信号衰减系数

子带信号	dB/mm			
	a_3	d_1	d_2	d_3
衰减系数	0.26	0.53	0.627	0.47

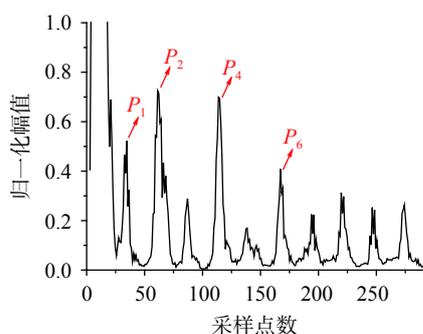


图6 重构信号

4 点焊超声检测有限元仿真

本文基于 COMSOL Multiphysic 多物理场耦合仿真平台,采用轴对称 2D 模型模拟超声波传播过程,研究不同熔核直径点焊超声检测信号规律,其几何模型如图 7 所示。由于实际的楔块直径为 7.6 mm,所以轴对称模型宽度取 3.8 mm,其他几何尺寸也与试验试块一致。模型中将熔核的半径定义为变量参数,分别取值为 1.25, 1.5, 1.75, ..., 3.5 mm 进行仿真研究,共得到 10 组仿真结果。当熔核直

径非常小时 (<2 mm),衍射作用对熔核直径的计算影响较大,此时可以将熔核视为一个衍射孔,透过熔核的能量大部分被衍射,仅小部分被探头接收,此时将熔核直径计算值定义为 0,故仿真模型熔核直径范围设置为 2.5~7 mm。

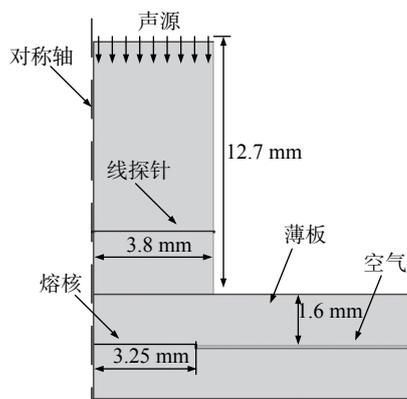


图7 点焊超声检测轴对称仿真模型

由表 2 的仿真数据可以看出,补偿后焊点熔核直径 D_2 相对于补偿前的 D_1 误差更小,说明该补偿方法对点焊熔核直径计算有一定效果。通过建立点焊超声检测有限元仿真模型,研究信号衰减对熔核直径计算结果的影响,仿真前后对比如图 8、图 9 所示。由于仿真模型只考虑了结构衰减,不存在材料衰减,相对实验来说效果不是十分明显。

表 2 点焊仿真信号数据

序号	原始熔核直径 D/mm	P_1	P_2	补偿前熔核直径 D_1/mm	误差值 S_1/mm	P_1'	P_2'	补偿后熔核直径 D_2/mm	误差值 S_2/mm
01	2.5	0.312	0.327	2.81	0.31	0.372	0.381	2.61	0.11
02	3	0.305	0.332	2.82	0.18	0.365	0.390	2.96	0.04
03	3.5	0.291	0.342	3.37	0.13	0.345	0.401	3.50	0.00
04	4	0.287	0.351	3.78	0.22	0.330	0.420	3.99	0.01
05	4.5	0.271	0.360	4.20	0.30	0.308	0.448	4.61	0.11
06	5	0.267	0.419	4.84	0.16	0.292	0.490	5.05	0.05
07	5.5	0.264	0.462	5.16	0.34	0.316	0.631	5.51	0.01
08	6	0.250	0.520	5.60	0.40	0.273	0.684	5.97	0.03
09	6.5	0.195	0.558	6.19	0.31	0.220	0.790	6.49	0.10
10	7	0.190	0.581	6.28	0.72	0.200	0.820	6.64	0.36

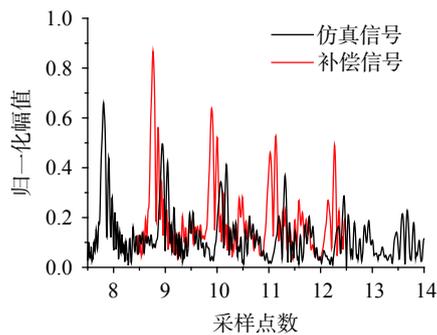


图 8 仿真信号补偿前后对比

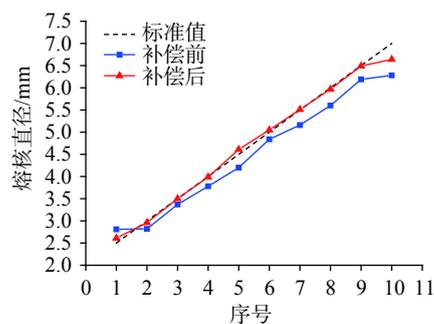


图 9 仿真模型熔核直径补偿前后数据对比

5 试验

本次试验所采用的焊板材料选用低碳钢 Q235, 试验板材选用 100 mm×30 mm 的长方形板材 20 组, 单层板厚度为 1.6 mm, 沿焊点试块中心线进行线切割如图 10 所示。本文采用超声 A 扫的方式检测焊点质量, 探头的型号为 15P6Y-H, 其中心频率为 15 MHz, 探头晶片直径为 7.6 mm。

本次试验通过改变点焊工艺参数得到不同熔核直径的焊点试块, 对焊点试块进行超声检测。为得

到焊点真实熔核尺寸, 沿焊点试块中心线进行线切割, 然后将试块进行打磨、抛光、腐蚀, 通过金相观察得到中心截面金相图, 如图 11 所示。通过小波变换对超声信号分解、补偿、重构, 得到原始熔核直径 D , 按照上述方法计算补偿后熔核直径 D_2 , 将计算结果与金相观察结果对比, 验证其计算精度, 结果如图 12 所示。利用金相图测量熔核直径 D , 并与超声检测信号计算的熔核直径结果对比, 验证结果如图 13 所示。通过补偿前后熔核直径数据分析对比, 可明显看出补偿前熔核直径计算误差较大, 而利用补偿后信号计算熔核直径结果与金相结果基本一致, 误差不超过 0.1 mm。

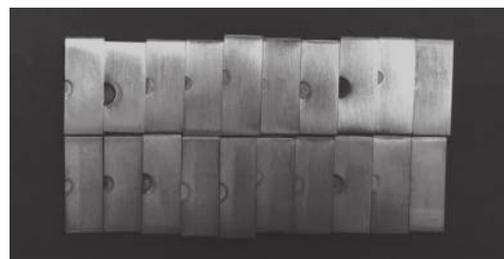


图 10 点焊线切割试块

6 结束语

本文针对超声衰减对薄板点焊熔核直径计算精度的影响, 提出一种基于小波变换的信号增益补偿方法, 通过仿真和试验数据对比, 证明该方法可有效减小熔核直径计算误差。本方法表现出以下特点:

1) 传统点焊超声检测熔核直径评估方法, 未考虑结构的衍射作用及材料的吸收、散射作用, 导致

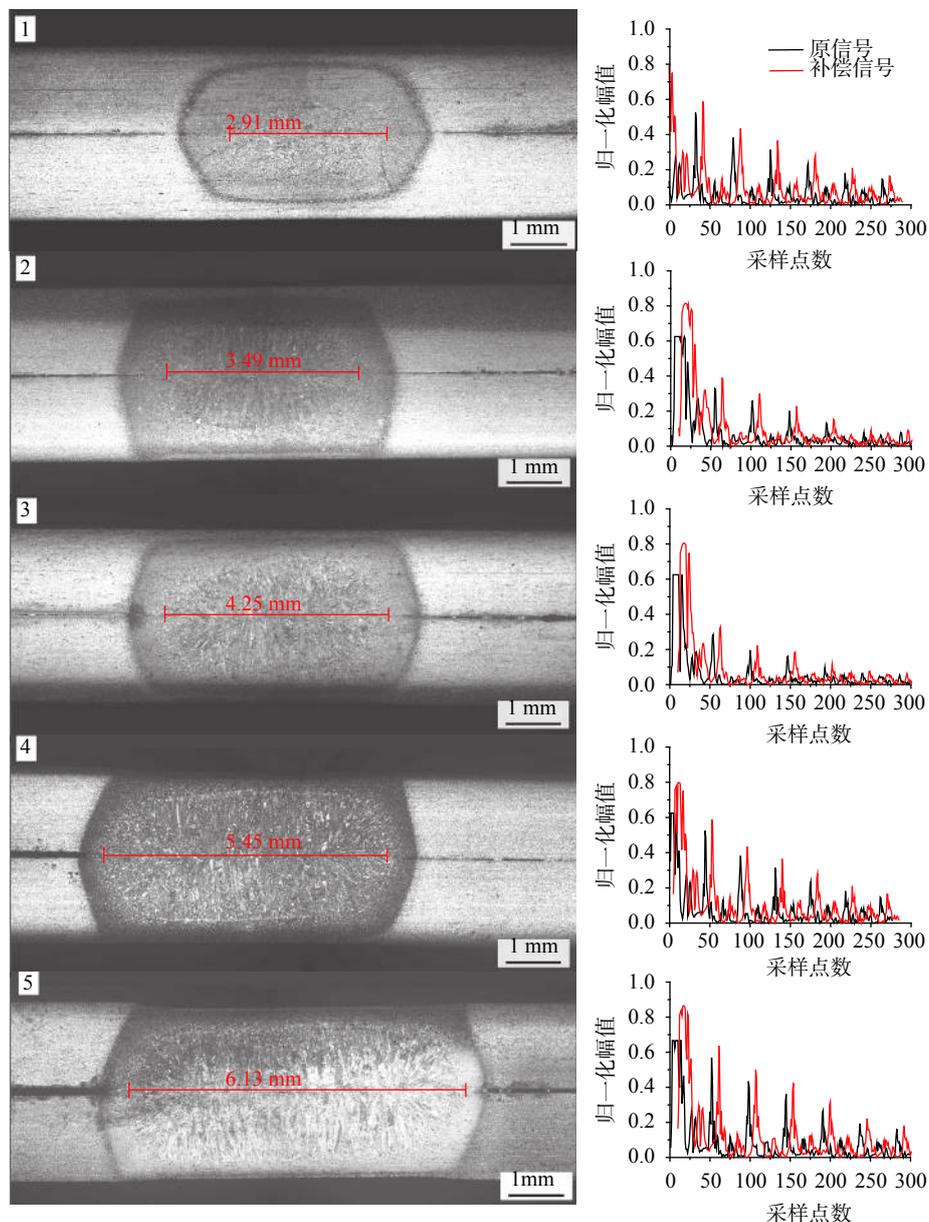


图 11 试块金相图及检测波形图

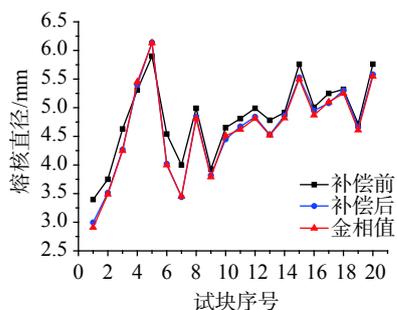


图 12 试验信号补偿前后熔核直径数值对比

评估结果误差很大。利用小波变换多分辨率功能，将检测信号分解为不同频率子带信号，对子带信号

分别补偿后重构，利用重构信号计算熔核直径可有效减小误差。

2) 本文构建不同熔核直径点焊仿真模型，得到不同熔核直径仿真信号，将仿真信号进行增益补偿，通过对比补偿前后熔核直径计算结果，证明了信号衰减对熔核直径计算精度的影响，从理论上论述了该补偿方法的可行性，并为试验提供理论基础。

3) 本文进行大量不同熔核直径点焊超声检测试验，通过所述增益补偿方法处理试验数据，将处理前后熔核直径计算结果与金相直径对比分析，证明了该补偿方法能有效减小熔核直径计算误差，计算误差不超过 0.1 mm。

表3 各焊点直径检测试验数据

序号	P_1	P_2	原始熔核直径 D_1/mm	误差值 S_i/mm	P_1'	P_2'	补偿后熔核直径 D_2/mm	金相直径 D/mm	误差值 S_j/mm
01	0.37	0.44	3.40	0.49	0.45	0.50	3.00	2.91	0.09
02	0.27	0.34	3.75	0.26	0.32	0.39	3.51	3.49	0.02
03	0.19	0.28	4.63	0.38	0.23	0.33	4.27	4.25	0.02
04	0.28	0.53	5.31	0.14	0.30	0.59	5.40	5.45	0.05
05	0.23	0.56	5.90	0.23	0.25	0.69	6.14	6.13	0.01
06	0.27	0.40	4.54	0.54	0.34	0.45	4.02	4.00	0.02
07	0.23	0.30	4.00	0.55	0.29	0.34	3.44	3.45	0.01
08	0.34	0.57	4.99	0.18	0.39	0.64	4.84	4.81	0.03
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
19	0.30	0.48	4.72	0.11	0.36	0.55	4.66	4.61	0.05
20	0.24	0.54	5.76	0.21	0.29	0.63	5.58	5.55	0.03

参考文献

- [1] LIU J, XU G C, GU X P, et al. Ultrasonic test of resistance spot welds based on wavelet package analysis[J]. Ultrasonics, 2014, 56: 557-565.
- [2] PYE S D, WILD S R, MCDICKEN W N. Adaptive time gain compensation for ultrasonic imaging[J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 1992, 18(2): 205.
- [3] WANG T, WANG C, XU G, et al. Ultrasonic scanning inspection research on Resistance spot welding joints[J]. Insight, 2014, 56(11): 617-621.
- [4] 许凯亮, 谈判, 他得安, 等. 超声导波的频散补偿与模式分离算法研究[J]. 声学学报, 2014, 39(1): 99-103.
- [5] 郭瑞鹏, 王海涛, 徐君, 等. 时间增益补偿在超声相控阵检测中的应用[J]. 无损检测, 2015, 37(12): 28-32.
- [6] DELRUE S, ABEELE KVD, BLOMME E, et al. Matar OB. Two-dimensional simulation of the single-sided air-coupled ultrasonic pitch-catch technique for non-destructive testing[J]. Ultrasonics, 2010, 50: 188-196.
- [7] 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(4): 39-42.
- [8] MOZURKEWICH G, GHAFARI B, POTTER T J. Spatially resolved ultrasonic attenuation in resistance spot welds: Implications for nondestructive testing[J]. Ultrasonics, 2008, 48: 343-350.
- [9] ROBERTS D R, MASON J, LEWIS C. Ultrasonic spot weld testing: attenuation study[J]. Insight, 2000, 42: 720-724.
- [10] 龙会国, 胡波涛. 铸钢件超声波衰减系数测量及其影响因素[J]. 铸造, 2011, 60(7): 676-679.
- [11] 张崧, 彭光俊, 史红. 超声法检测金属薄板点焊接头质量研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(11): 1392-1394.
- [12] 李恩学, 罗福兴, 吴程程, 等. 基于准三维超声成像的电阻点焊定量检测技术研究[J]. 机电工程, 2016, 33(7): 822-826.
- [13] 崔治. 小波分析在超声检测信号处理中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.

(编辑:徐柳)