

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.07.009

基于准三维超声成像的电阻点焊 定量检测技术研究^{*}

李恩学¹, 罗福兴², 吴程程³, 杨克己³

(1. 天津钢管集团股份有限公司, 天津 300301; 2. 杭州浙达精益机电技术股份有限公司, 浙江 杭州 311121;
3. 浙江大学 现代制造工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对利用传统超声C扫成像方法对电阻点焊定量检测时图像对比度分辨率低的问题,对超声波在被测构件中传播时表现出的衰减特性进行了研究,分析了电阻点焊超声信号的特征,测定了超声检测信号在被测工件中的衰减系数,提出了一种准三维电阻点焊超声成像方法。该方法基于小波多子带差异性补偿算法,同时对超声波传播的距离和频率进行了补偿,在减小超声波衰减的同时也提高了电阻点焊超声图像的对比度分辨率。利用该方法开展了电阻点焊相关参数的定量化检测研究,并进行了相关的实验验证。研究表明,该技术有效提高了电阻点焊超声成像的对比度分辨率,可以避免图像中目标检测对象与背景的融合现象,提高了电阻点焊参数的定量化检测能力,并可检测结果友好表征。

关键词:电阻点焊;质量评价;超声成像;对比度分辨率;定量检测

中图分类号:TG115.28;TH878⁺.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)07-0822-06

Quantitative detection technology of resistance spot welding based on quasi three-dimensional ultrasonic imaging

LI En-xue¹, LUO Fu-xing², WU Cheng-cheng³, YANG Ke-ji³

(1. Tianjin Pipe Group Corporation, Tianjin 300301 China; 2. Hangzhou ZhedaYingyi Electromechanical Technology Corporation Limited, Hangzhou 311121, China; 3. Institute of Modern Manufacture Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem of low-contrast resolution of the conventional ultrasonic C-scan imaging for resistance spot welding quantitative detection, the attenuation characteristics of ultrasonic wave propagation in the tested structure were studied. The characteristics of resistance spot welding ultrasonic signals were analyzed, the attenuation coefficient of ultrasonic signals in the workpiece was measured, and a quasi three-dimensional resistance spot welding ultrasound imaging method based on wavelet multi-sub-band difference compensation algorithm was proposed. The frequency and distance attenuation of ultrasonic propagation was compensated simultaneously, the attenuation was reduced and the contrast resolution of resistance spot welding ultrasound image was increased. This method was applied into the study of quantitative detection for resistance spot welding parameters and verified in related experiments. The results indicate that the contrast resolution of resistance spot welding ultrasound imaging is increased effectively, the phenomenon of target object image fusion in background is avoided, and the capability of resistance spot welding parameters quantitative detection and test results characterization are improved.

Key words: resistance spot welds; quality assessment; ultrasonic C-scan imaging; quantitative detection; contrast resolution

0 引言

电阻点焊(resistance spot welding, RSW)技术是一

种常用的金属薄板件连接技术,被广泛地应用在载人航空、国防军工、电子通讯、智能家电等现代制造业和高新

收稿日期:2015-12-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175465)

作者简介:李恩学(1970-),男,天津人,高级工程师,主要从事轧钢机械及电气设备管理方面的研究. E-mail:LEX2480@sina.com

技术产业中^[1-3],电阻点焊的焊接质量直接影响以上行业中产品的稳定性、可靠性和安全性。但由于在电阻点焊的生产过程中很难直接提取焊接质量的参数信息,致使难以在生产中控制焊接质量。因此,电阻点焊技术的实际应用中迫切地需要借助先进的无损检测手段来保证其质量。针对以上应用背景和现状,对电阻点焊质量检测技术进行深入研究具有十分重要的工程意义。

相比于其他的无损检测技术,超声波成像技术以其独特的优势可以对电阻点焊的焊接表面和焊点内部的情况进行有效的定量化检测。其性能与检测结果生成的超声图像质量非常相关,超声波图像质量的高低关系到该技术后续应用的性能好坏。然而,电阻点焊超声成像检测技术目前仍在成像条件和成像方式上受到限制,导致超声图像的对比度分辨率不高。并且目前已开展的超声成像研究仍局限在单个截面的二维成像,仅利用接收到的反射回波强度所对应的灰度信息来进行图像绘制,不仅无法得到全局的图像信息,在图像显示上也不够清晰,需要专业人员辨认。除此之外,目前的电阻点焊超声波 C 扫描成像技术还存在点焊表面信息与内部焊核信息混叠的问题^[4],导致对于点焊表面及其内部状况的多参数定量化检测还比较困难。

因此,本研究根据电阻点焊质量的超声波成像评价标准,利用小波变换算法对超声波衰减引起的信号失真进行多子带差异性补偿,有效地提高超声波成像的对比度分辨率。为了解决电阻点焊 C 扫描成像中存在的问题,本研究提出一种改进型的超声 C 扫描成像方法,该方法能实现电阻点焊的准三维超声成像,可以满足电阻点焊相关参数的定量化检测要求。

1 电阻点焊的超声信号特征

电阻点焊生产中的焊接原理示意图如图 1 所示。

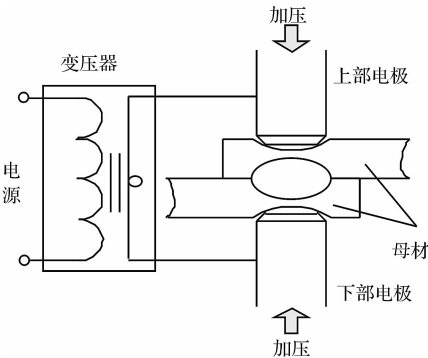


图 1 电阻点焊的焊接原理示意图

上、下两块金属母材被紧压在一起形成焊接区域,当大电流经过焊接点时会产生大量的焊接电阻热,焊接点区域附近的母材会因此而熔化,在外部挤压应力的帮

助下,上、下母材被牢牢地结合在了一起。电阻点焊区域分为未焊接区和焊接区,焊接区包括熔合在一起的焊核部分以及焊核两侧因挤压应力而产生的压痕部位,未焊接区内两块母材结合面存在一定大小的缝隙。

超声波成像检测系统通常利用水浸式超声脉冲反射法获取成像所需要的 A 扫描回波数据。一般电阻点焊件在 A 扫描超声检测中具有 3 种类型的特征回波信号,信号示意图如图 2 所示。

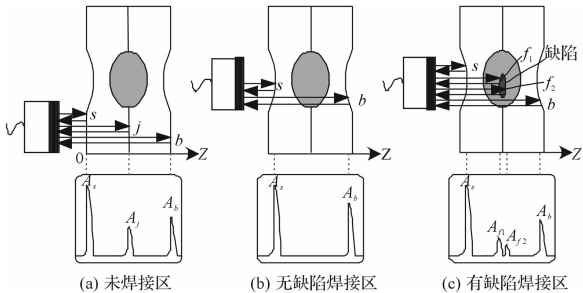


图 2 电阻点焊 A 扫描超声特征信号示意图

未焊接区的 A 扫描回波信号如图 2(a) 所示,超声波检测脉冲在被测焊件的内部传播,超声波遇到被测焊接点表面 s 、母材结合面 j 和焊点底面 b 时由于界面声阻抗的不同,部分超声波被反射。焊点内部的焊核中无缺陷时的回波如图 2(b) 所示,由于焊核是母材金属熔化形成的,焊核声阻抗特性与母材相似,超声波不会在焊核中反射,只在焊点表面 s 和焊点底面 b 反射。焊点内部有缺陷时的焊接区域超声回波如图 2(c) 所示,除了表面 s 和底面 b 反射回波信号,一部分超声信号遇到焊核内部缺陷的上表面 f_1 与下底面 f_2 后产生反射,而往往缺陷上下表面的回波会叠加在一起成为表征缺陷的反射回波^[5-7]。A 扫描超声信号是超声成像的基础,其纵坐标表示反射回波强度,横坐标表示渡越时间,它与材料声速的乘积为超声信号传播的距离,也就是点焊件的深度信息。

2 基于小波变换的声波衰减多子带差异性补偿技术

超声波在工件的传播过程中声能量会发生衰减,如果直接把超声反射回波的原始 A 扫描信号融合作为 C 扫描成像,图像的对比度分辨率会随着超声波传播深度的增加而明显降低。而超声波 C 扫描成像的对比度分辨率直接决定了检测系统对微小缺陷引起的超声回波信号的检测能力。因此,在 C 扫描成像前需要对反射回波的原始信号进行补偿,从而改善超声成像的对比度分辨率。

超声波的衰减规律可表示为:

$$P = P_0 e^{-\alpha s} \tag{1}$$

式中： P_0 — 超声波入射到工件界面后直接反射的回波信号幅值， P — 超声波在工件中传播任意一段距离 s 后的反射回波信号幅值， α — 超声波在工件材料中的衰减系数，它与超声波的频率有关。

超声检测时探头发射的一般是具有多种频率成分的宽带信号，不同频率成分的超声波衰减系数不同^[8-9]，高频成分的超声波的衰减较快，低频成分的超声波衰减较慢，必须计算不同频率成分超声波的衰减系数，分别进行差异性补偿。由于小波变换算法具有多分辨率尺度的信号分析能力，可以将超声回波信号分解成不同频率的子带信号，利用这些子带信号进行衰减系数的测定与差异性补偿。

2.1 材料中超声衰减系数的测定

超声波材料衰减系数的测定方法是通过多次脉冲

反射法^[10]得到多次底面反射回波原始信号，笔者选取其中连续的 3 个底面回波如图 3(a) 所示，根据实际采样信号的长度，利用离散化小波变换方法将原始信号进行 4 级分解后得到 $x_k^{(4)}$ 、 $d_k^{(4)}$ 、 $d_k^{(3)}$ 、 $d_k^{(2)}$ 和 $d_k^{(1)}$ 5 个不同频率的子带信号，如图 3(b ~ f) 所示。根据衰减系数的表达式，分别在各子带信号内计算各频带的衰减系数 α ，如下式所示：

$$\alpha = \frac{\ln \frac{A_m}{A_n}}{2(n - m)T} \tag{2}$$

式中： A_m 、 A_n — 超声回波信号中第 m 次与第 n 次的底面回波信号 ($n > m$) 幅值； T — 被测件的厚度。实验选取了厚度 $T = 22 \text{ mm}$ 的标准试件，其材料与点焊件相同。

结果如表 1 所示。

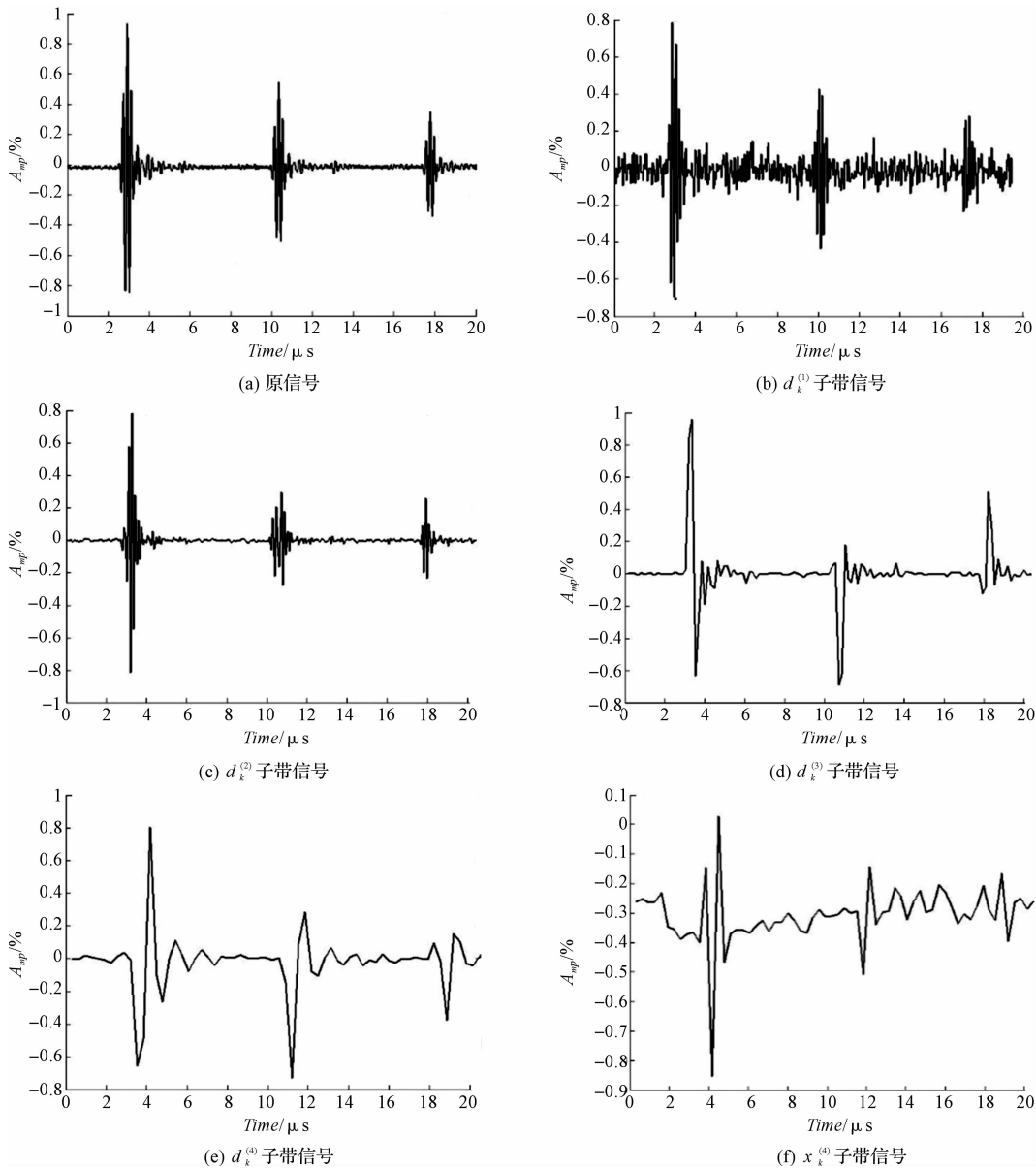


图 3 原始信号和小波变换后的子带信号

表1 不同子带信号的衰减系数

子带	$x_k^{(4)}$	$d_k^{(4)}$	$d_k^{(3)}$	$d_k^{(2)}$	$d_k^{(1)}$
衰减系数 $\alpha/(\% \cdot \text{mm})^{-1}$	0.85	0.87	0.73	1.24	1.15

2.2 子带差异性补偿技术

根据超声波衰减公式,补偿是一个逆运算的过程,即:

$$P' = Pe^{\alpha s} \tag{3}$$

因此,本研究使用小波变换分解原信号后得到不同频带的超声信号,在各子带内根据式3得到补偿后的各子带信号,通过小波反变换将子带信号重构得到最终的补偿信号。

为了验证该算法的可行性,本研究选择材料为20#钢的三孔试件,对其进行B扫描成像。笔者选取db4作为小波基,并利用表1中求得的各子带衰减系数进行补偿,补偿后的结果如图4所示。

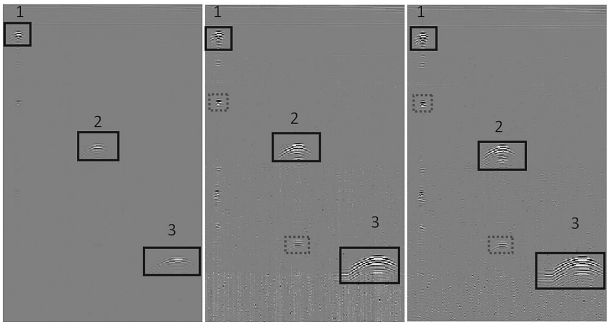


图4 原始B扫描图像与补偿算法处理后的结果对比

原始B扫描图像如图4(a)所示,从图中可以看出随着深度的增加,实线框中的图像(内孔上表面)对比度分辨率有所降低,并逐渐与背景融为一体。而且由于内孔的上表面将大部分传播到此处的声波能量反射,导致能够传播至内孔下表面的超声波能量变小,随着超声信号在传播过程中的衰减,在图像上将无法显示更深处的缺陷信息。利用传统时间控制增益(time controlled gain, TCG)补偿算法得到的B扫描图像如图4(b)所示,虚线框内所示的图像信息表示是内孔的下端回波,由于超声波在水中传播的声速比在钢中低,声波从孔上端经过孔中水介质到达孔下端的渡越时间时间远大于在相同长度钢中传播的时间,导致了孔下端与孔上端的成像距离变大,其中孔3的下表面部分已经超出了图像的显示范围,故无法在图像中表示,而且该图像的下半部分增加了大量噪声。采用本研究提出的补偿算法处理后的B扫描图像如图4(c)所示,从图中可以看出被测试块中3个内孔的上表面反射回波都可以清晰辨认,1号孔和2号孔的下表面回波也都能辨认。综上,本文提出的补偿算法明显提高了图像的对比度分辨率,并且图

像中的斑点噪声也比使用传统TCG算法补偿后的图像要小,即明显提高了图像的信噪比。

3 电阻点焊准三维超声成像及其定量检测

3.1 改进型C扫描超声成像

本研究利用多子带差异性补偿技术得到补偿超声信号,作为成像的基础数据,用来研究电阻点焊超声成像技术。C扫描成像面为与波矢方向垂直的横断面^[11],针对点焊的特定深度扫描层进行探测。但通过成像实验发现,由于超声波在水中与在点焊材料中的传播速度相差较大,超声波探头接收到的焊接表面回波与未焊接的母材结合面回波信号的飞行时间相隔相近,使得焊核C扫描表面成像与焊核成像效果较差。

为了解决这一问题,学者陈振华提出将A扫描超声信号的x轴量纲由时间改为距离,研究了一种电阻点焊C扫描超声成像改进技术。通常被检测件的表面反射回波信号具有以下特点:在所有回波信号中是能量最大,表征着传播介质转换的分界点。超声波首先在水中传播,入射至待测件表面后,一部分在界面发生反射,另一部分透射至待测试件内。因此,本研究选取A扫描信号中的最大幅值回波 $A_{\max}$ 作为分界点,通过 $A_{\max}$ 之前的信号渡越时间和水中超声波传播速度 $v_{\text{水}}$ 相乘得到到点焊件表面的深度信息, $A_{\max}$ 之后的渡越时间与钢中超声波速度 $v_{\text{钢}}$ 的乘积得到点焊件内部的深度信息,转换后的A扫描超声信号为 $f(n)$,其中:横坐标—传播距离 $d(n)$,纵坐标—反射回波强度 $A(n)$ 。

改进后的点焊C扫描成像结果如图5所示。

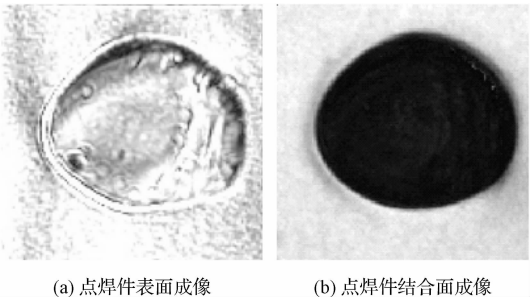


图5 改进后的电阻点焊表面、结合面C扫描超声成像

该方法有效解决了材料声速差异与渡越时间不同所引起的成像困难,成像结果能完整地表征点焊件的表面质量状况,如图5(a)所示,与实际情况相符。而点焊件结合面C扫描超声成像如图5(b)所示,焊核边界轮廓清晰、完整,焊核的质量状况清楚地显示出来。

然而,C扫描成像仍缺乏点焊的深度信息,无法表

示压痕的深度信息,且对表面压痕直径和焊核直径的检测存在误差。因此,本研究进一步提出一种电阻点焊准三维成像技术。

3.2 准三维超声成像

本研究以改进后的 C 扫描成像算法为基础,将扫描点门限内回波的最大幅值变换为灰度值,记录其对应的深度信息,进而将深度信息转化为三维图像,实现电阻点焊准三维超声成像。成像流程为:① 获取扫描点的 A 扫描超声回波信号 $f_{ij}(n)$ 数组;② 获取门内的最大回波幅值 $A_{i \max}$, 记录其对应的深度坐标位置 $d_{ij \max}$, 将其存入图像的二维数组 Z ;③ 重复上述过程,直至完成所有扫描点的 A 扫描超声信号;④ 利用 x 轴与 y 轴坐标信息以及图像数组 Z 进行成像。

然而,超声波入射到局域声阻抗较差的材料界面将发生反射,如果焊核内部无缺陷,超声波将不会产生反射回波。因此,在对焊核进行 C 扫描成像时,理论上门限内的回波幅值为 0 时,取其深度坐标值即可。但由于实际的检测系统存在系统噪声,故需设定一个门限阈值,本实验中该阈值设定为 9 mV。

焊核区域的准三维超声波成像结果如图 6 所示。

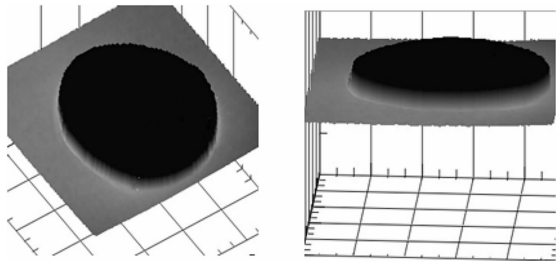


图 6 焊核准三维超声成像

从图 6 中可以看出焊核质量良好,未发现明显焊接缺陷。

3.3 多参数的定量检测

由于电阻点焊准三维超声成像中的各点都含有 XY 平面的坐标信息以及 Z 方向的深度信息,通过提取图像的轮廓特征信息,可以对点焊进行多参数的定量检测,主要包括点焊的压痕大小、深度及焊核大小。

本研究将电阻点焊表面的三维图像均匀投影至 XY 平面,将点焊表面压痕的最大与最小直径轮廓分别

投影至 XZ 平面和 YZ 平面。图像 X 方向的像素值与探头在 X 轴方向扫描步进值相乘得到 X 轴方向的长度,图像在 Y 方向的像素值与探头在 Y 轴方向扫描步进值相乘得到 Y 轴方向的长度,公式如下:

$$L_x = x_i \times s_x \tag{4}$$

$$L_y = y_i \times s_y \tag{5}$$

其中: $s_x = s_y = 10/128 \text{ mm}$,表面压痕直径为两个点的差值。测量发现,点焊表面压痕的最大直径 $d_{\max}$ 为 7.54 mm,最小直径 $d_{\min}$ 为 6.72 mm。

同上,获得 XZ 和 YZ 投影平面上的图像轮廓,Z 轴表示深度信息。经计算,点焊表面最大直径处的压痕深度 $h_{\max}$ 与点焊表面最小直径处的压痕深度 $h_{\min}$ 分别为 0.421 mm 和 0.371 mm。根据式(4)和式(5),最大焊核直径 $D_{\max}$ 为 8.14 mm,最小焊核直径 $D_{\min}$ 为 6.49 mm。

3.4 实验结果及分析

表面压痕的实测最大直径 $d_{\max}$ 为 7.61 mm,实测最小直径 $d_{\min}$ 为 6.53 mm,与上述测量值的误差仅为 0.51% 和 0.32%。为了进一步地了解点焊内部的焊核状况,将焊件沿最大直径切割并打磨、抛光,利用光学显微镜拍摄结果如图 7 所示。

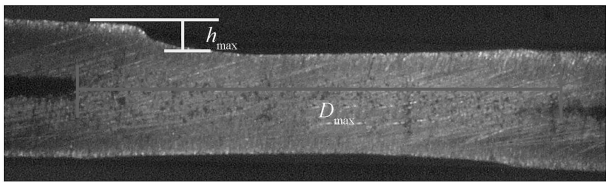


图 7 电阻点焊截面光学显微镜成像结果(沿最大直径切割)

从图 7 中可以看出该焊点的焊接质量良好,无焊接缺陷。点焊表面压痕实测深度 $h_{\max}$ 为 0.42 mm,焊核实测最大直径 $D_{\max}$ 为 8.34 mm,与上述测量值的误差分别为 2.35% 和 2.61%,数据汇总如表 2 所示。

表 2 点焊试件测量实际值和测量值对比

测量项目	实际值 /mm	测量值 /mm	测量误差 /%
表面压痕最小直径 $d_{\min}$	6.53	6.55	0.32
表面压痕最大直径 $d_{\max}$	7.61	7.63	0.51
沿最大直径表面压痕深度 $h_{\max}$	0.43	0.35	2.34
焊核最大直径 $D_{\max}$	8.32	8.14	2.62

(下转第 847 页)

本文引用格式:

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):822-826,847.
LI En-xue¹, LUO Fu-xing, WU Cheng-cheng, et al. Quantitative detection technology of resistance spot welding based on quasi three-dimensional ultrasonic imaging[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(7):822-826,847.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>