

基于超声波 C 扫描的 SUS304 不锈钢板点焊接头质量分析

张 龙 曾 凯 何晓聪 邢保英 孙鑫宇

(昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650500)

文 摘 利用超声波水浸聚焦入射法对 1 mm 厚的 SUS304 奥氏体不锈钢板点焊接头进行超声 C 扫描成像检测;研究了不同焊接工艺参数下获得点焊接头的超声波 C 扫描图像特征,据此分析了接头的焊核直径,并与焊核切口端面尺寸进行了比较;对点焊接头进行了拉伸—剪切试验,测试了接头的力学性能。结果表明:超声波水浸聚焦入射法能够观测出点焊焊核直径,并能有效地观测出焊核内部形貌特征。当焊接电流为定值(4 kA),供给压力为 0.15 MPa 时,接头出现飞溅、焊穿等缺陷,并且在超声波 C 扫描图像中能够清晰地反映出来;当供给压力为 0.45 MPa 时,虽然点焊焊核直径增大,且未出现焊接缺陷,但是过大的供给压力导致接头厚度变小,影响了接头抗拉强度。当供给压力为定值(0.4 MPa),焊接电流为 9 kA 时,在 C 扫描图像上同样反映出飞溅、焊穿等典型的焊接缺陷,此时接头的失效载荷及能量吸收值急剧下降。

关键词 点焊,超声波 C 扫描,拉伸—剪切试验,焊核直径,焊接缺陷

中图分类号: TG115.28

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.02.016

Analyses on Joint Quality of Spot Welds on SUS304 Stainless Steel Based on Ultrasonic C-Scan

ZHANG Long ZENG Kai HE Xiaocong XING Baoying SUN Xinyu

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

Abstract The quality of spot welds in 1mm SUS304 austenitic stainless steel sheet metal was evaluated by using ultrasonic water immersion focusing method. The specifics of nugget diameters and the ultrasonic C-scan image were analyzed under different welding process parameters. Furthermore, the tensile-shear tests were carried out to examine the mechanical behavior of sport welds. Results show that the C-scan image can get nugget diameter and effective information from the inner pattern of the spot weld based on ultrasonic water immersion focusing method. When the welding current is 4 kA and the supply pressure is 0.15 MPa, it can get the information which included splash, solder to wear and other weld defects from the ultrasonic C-scan image. When the supply pressure is 0.45 MPa, the nugget diameter is increasing. But the excessive supply pressure leads to the joint thickness decreasing and the joint quality is failing. When the supply pressure is 0.4 MPa and the welding current is 9 kA, the failure strength and energy absorption value decrease rapidly, it can get the information which includes splash, solder to wear and other weld defects from the ultrasonic C-scan image.

Key words Spot weld, Ultrasonic C-scan, Tensile-shear tests, Nugget diameters, Weld defects

0 引言

电阻点焊以其加热集中、易于实现自动化的优点被广泛应用于航空、航天、汽车等制造行业^[1-2]。目

前,国内外针对电阻点焊力学性能的研究范畴主要集中在破坏性试验、金相显微组织观察以及通过拉伸剪切试验来观察断面形貌上。F. REVERDY 等^[3-4]对抽

收稿日期:2015-10-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(5565022;5565023)

作者简介:张龙,1990 年出生,硕士研究生,主要从事材料连接及质量检测分析、结构可靠性设计。E-mail:1028699470@qq.com

通讯作者:曾凯,博士。E-mail:kmzk201109@163.com

查的点焊产品构件和点焊试验片进行了破坏性试验,来检测焊核直径用以评估接头质量。林建平^[5-6]通过金相显微镜观察了接头的金相显微组织特征,通过分析点焊接头的显微组织,研究了点焊接头力学性能的变化规律。韩立军等^[7]以超高强度淬火钢为研究对象,利用优化的焊接参数实现了超高强钢同种材料之间的优质连接,进行了高强钢的点焊接头拉伸试验和焊点表面硬度分布试验以及对拉伸断口的扫描电镜分析。且国内外针对铝合金、镀锌钢板等材料的点焊超声波检测也有了新的研究^[8-9]。关于 SUS304 奥氏体不锈钢板基于超声扫描来对点焊接头质量进行研究的文献尚未见报道。

本文借助于超声扫描显微镜,分析研究不同焊接工艺参数下获得的点焊接头的超声波 C 扫描图像特征;并借助于电液伺服材料试验机,对试件进行静力学试验,从接头直径测量、失效载荷、失效模式及能量吸收等方面分析点焊接头的力学性能。

1 实验

1.1 试件制备

被连接材料为 SUS304 奥氏体不锈钢板,国标为 0Cr18Ni9。采用单搭点焊试样,连接尺寸为 110 mm×20 mm×1.0 mm。由于母材抗拉强度的不同会影响工艺参数的选取,这里选取母材抗拉强度为 820 MPa, HV 硬度为 255,采用 DN-63 型交流点焊机对 SUS304 奥氏体不锈钢板连接。

根据不同的焊接参数,将被连接材料分为两组:A 组的焊接电流为 4 kA,改变供给压力;B 组的供给压力为 0.4 MPa,改变焊接电流。其他焊接参数(3 级电压、4 周焊接时间)均相同,相关参数见表 1。

表 1 点焊试件工艺参数

Tab. 1 Spot welding specimens processing parameters

试件	供给压力/10 ⁵ Pa	试件号	焊接电流/kA
A1	1.5	B1	4
A2	2.5	B2	6
A3	3.5	B3	8
A4	4.5	B4	9

1.2 超声检测试验

采用超声波水浸聚焦入射法对焊接好的不锈钢板的焊接接头进行超声 C 扫描成像检测,检测的设备为 CS-400A 超声扫描显微镜,该超声波检测设备的系统能够较好地实现对点焊试件的超声 A 扫描与 C 扫描,信号的采集处理及 C 扫描图像的显示。其中,探头的采样频率为 30 MHz,工作频率为 15 MHz,探头的分辨率为 0.95 μm,焦距为 19.05 mm,增益为 8。

1.3 静力学试验

利用电液伺服材料试验机对扫描好的试件进行拉伸—剪切试验。为了减小试验过程中试件产生的附加弯矩,在试件两端夹持 25 mm×20 mm×1.0 mm 垫片,保证试件夹持端的厚度一样。拉伸速率设为 5 mm/min,对每组接头进行 6 次重复拉伸—剪切试验。

2 结果及分析

2.1 不同焊接参数下对焊核直径的测量

为了更好的获得点焊接头内部结构信息,探究接头质量,通过多次改变焊接工艺参数,对不同焊接工艺参数下获得的接头进行评估。图 1 为不同焊接工艺参数下经过 C 扫描获得的点焊接头内部图样。

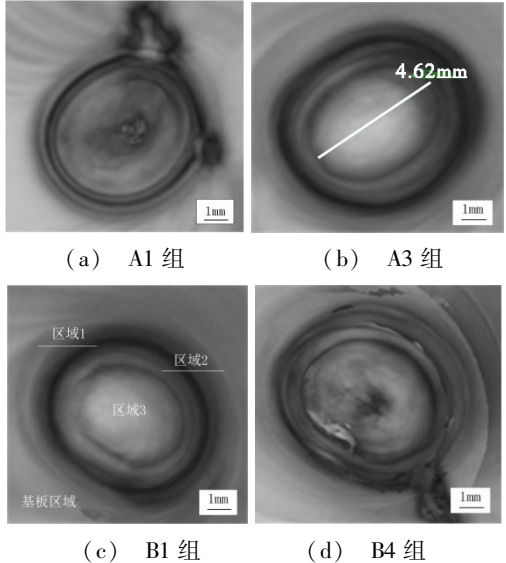


图 1 点焊焊核的 C 扫描测量图像

Fig. 1 Spot welding nugget diameters in C-scan image

根据图像中对应波形信号的幅值、波形特征的变化,可将接头 C 扫描图像分为 3 个特征区域,如图 1(c)所示。其中:区域 1 为焊核外层的黑色区域;区域 2 为介于两黑色区域间的白色区域;区域 3 为焊核中部的圆形白色区域;最外侧灰色的部分为基板区域。

在每组的 6 个试件中,分别选取图 1(c)中 C 扫描图像的区域 1、区域 2、区域 3 的内边缘作为点焊各区域的起始点,测得焊核直径[图 1(b)];对焊核进行传统点焊质量检测(对实验片进行破坏性试验),来检测点焊焊核直径尺寸,对接头质量进行评估,如图 2 所示。将通过超声波 C 扫描获得的点焊焊核直径与破坏性试验测得的实测值总结于表 2。



图 2 点焊焊核的金相图

Fig. 2 Spot welding nugget diameters in metallographic image

表2 点焊焊核直径 C 扫描图像测量值与实测值对比表

Tab.2 Comparison spot welding nugget diameters in C-scan image with inspection diameters

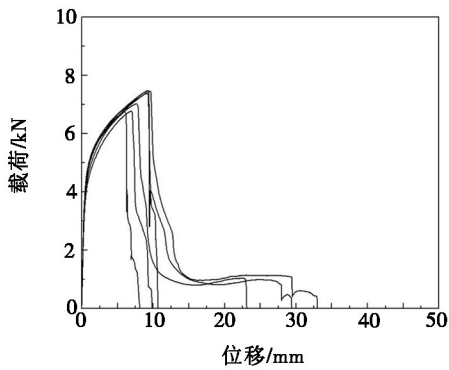
试件	焊核直径		试件	焊核直径	
	C 扫描	实测值		C 扫描	实测值
A1	4.54	4.31	B1	4.76	4.52
A2	4.39	4.27	B2	4.91	4.69
A3	4.62	4.44	B3	5.11	4.87
A4	4.84	4.64	B4	5.25	5.08

采用区域3内缘作为起始点测量时,超声波 C 扫描的测量值比破坏性试验的实测值大 2.6% ~ 5.3%,与实际最为接近。考虑超声波扫描实验所用探头的分辨率为 95 μm ,因此存在小范围(9.5%以内)的测量误差是难以避免的。

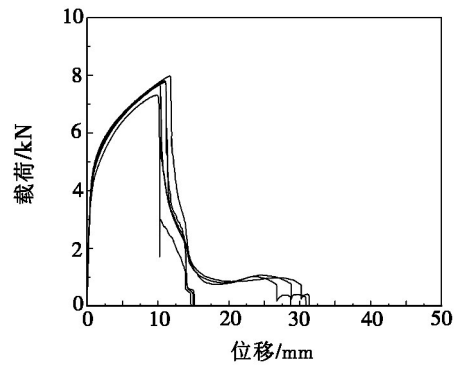
通过选择有效的特征区域对点焊接头进行超声波 C 扫描及破坏性试验,可以看出随着供给压力和焊接电流的不断增大,焊核直径呈不断增大趋势;并且在 C 扫描图像上,A1 组与 B4 组能够清楚地反映出焊穿、飞溅等典型的焊接缺陷。

2.2 静失效载荷分析

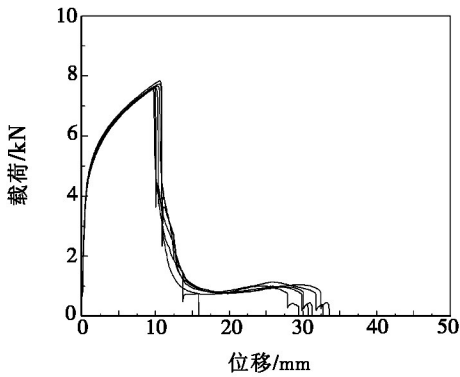
通过对各组点焊接头进行重复性拉伸-剪切试验后,所得到的接头的载荷-位移曲线如图 3 所示。为了验证试验结果的有效性,首先用 MATLAB R2014a 中 lillietest 正态分布拟合优度测试函数验证试验结果是否服从正态分布;再使用 normfit 正态分布参数估计函数(置信水平为 95%)对试验结果进行验证。验证结果表明,各组接头静失效载荷均值及标准差均满足其置信区间的要求,如表 3 所示。



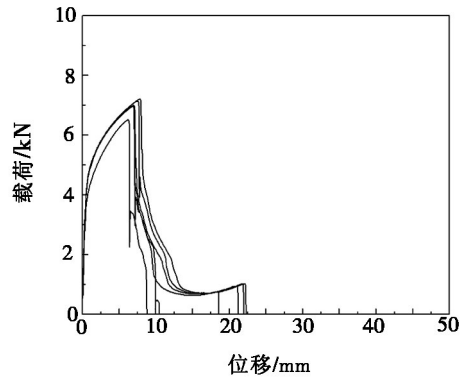
(a) A1 组



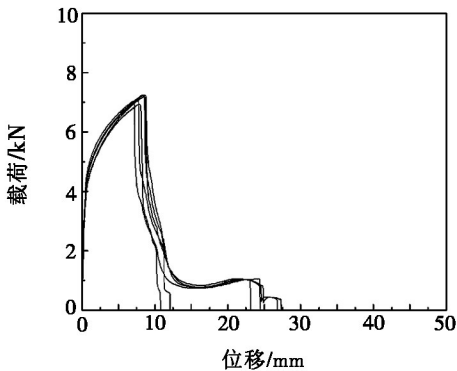
(b) A2 组



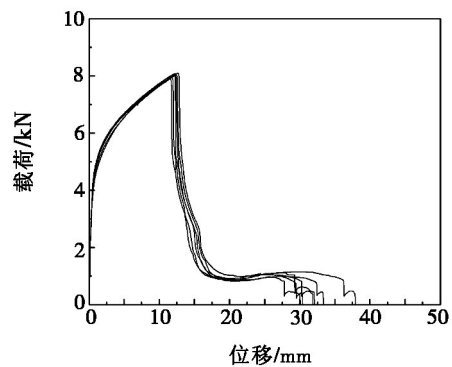
(c) A3 组



(d) A4 组



(e) B1 组



(f) B2 组

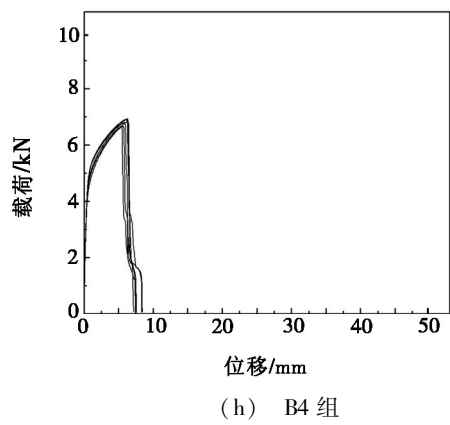
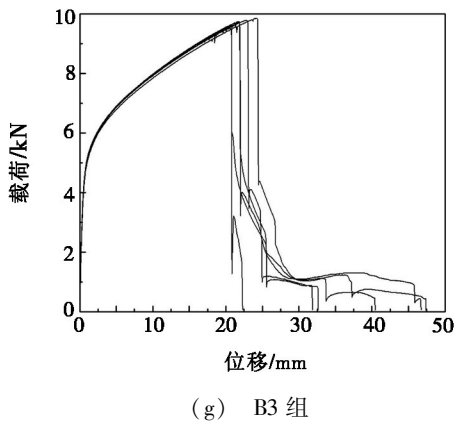


图3 接头拉伸—剪切试验载荷—位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves of different joints for tensile-shear test

对于 SUS304 奥氏体不锈钢板点焊接头,当焊接电流不变时,随着供给压力(0.15 ~ 0.45 MPa)的不断增大,点焊焊核直径呈不断增大趋势(表 2),而失效载荷随着相应的供给压力的增加先增加后减小;当供给压力不变时,随着焊接电流(4 ~ 9 kA)的不断增大,点焊焊核直径呈不断增大趋势(表 2),而失效载荷随着焊接电流(4 ~ 8 kA)的增加从 7 116.8 N 增加到 9 707.1 N,当焊接电流为 9 kA 时,失效载荷急剧下降至 6 799.5 N(表 3)。

通过分析各组接头载荷—位移曲线及正态分布参数估计值可以看出,供给压力过大时,虽然焊核直径增大了,但是过大的供给压力导致焊点接头厚度变小,影响了接头抗拉强度,静失效载荷甚至小于有焊接缺陷的 A1 组[图 1(a)]。改变焊接电流时,当点焊接头不存在焊接缺陷时[图 1(c)],随着焊核直径的增大,静失效载荷呈上升趋势;当接头出现焊接缺陷时[图 1(d)],即使焊核直径继续增加,接头的静失效载荷也会产生急剧下降的情况。

表 3 各组接头正态分布参数估计值

Tab. 3 Normal distribution parameter estimation values of different joints

试件号	均值 /N	标准差	均值置信区间/N	标准差置信区间/N
A1	7143.9	340.5	[6786.6,7501.3]	[212.5,835.1]
A2	7717.7	217.1	[7489.8,7945.5]	[135.5,532.4]
A3	7683.3	92.7	[7586.0,7780.6]	[57.9,227.4]
A4	6971.3	240.8	[6718.6,7224.0]	[150.3,590.6]
B1	7116.8	127.6	[6982.8,7250.7]	[79.7,313.0]
B2	8017.5	76.6	[7937.0,8097.9]	[47.8,188.0]
B3	9707.1	123.6	[9577.4,9836.8]	[77.2,303.2]
B4	6799.5	115.6	[6678.3,6920.8]	[72.1,283.4]

2.3 失效模式分析

对各组点焊接头进行重复性拉伸—剪切试验后,所得到的各组接头的失效模式如图 4 所示。对于 SUS304 奥氏体不锈钢板点焊接头, A2 ~ A3 组及 B1 ~ B3 组中主要失效模式为基板撕裂失效[图 4(c)]。在拉伸—剪切试验过程中,随着位移的不断增大,载荷急剧增加,接头和基板发生弹性变形。当载荷达到最大值后,在一个很小的位移内载荷急剧下降,此阶段对应于接头的边缘处出现裂纹。当载荷随着位移的增加而出现平稳并有所上升的阶段时,便开始进入漫长的基板撕裂过程,最终为基板撕裂失效。这是由于接头强度较高,带动基板出现撕裂直至撕断基板,这种失效模式的基板产生明显变形。

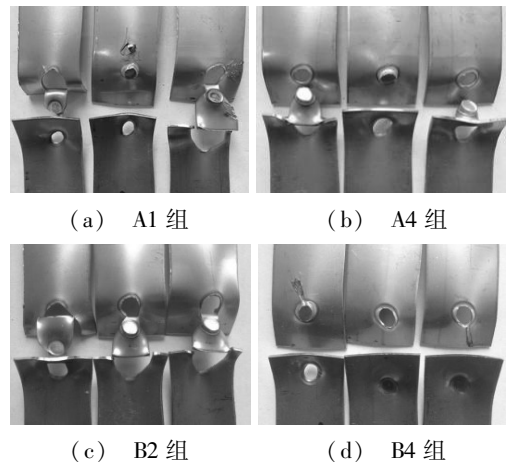


图 4 接头失效模式

Fig. 4 Failure modes of different joints

B4组中主要失效模式为接头断裂失效[图4(d)],A4组中主要失效模式为混合失效(基板未完全撕裂而接头断裂失效)[图4(b)],出现这两种失效模式是因为接头强度不足而无法带动基板撕裂或无法带动基板撕裂完成。在这两种失效模式下,基板产生的变形程度不明显。A1组存在以上三种失效模式[图4(a)],因此,在改变供给压力时,当点焊接头存在焊接缺陷时,试件的失效模式并不明显。而在B4组中,随着位移的增大,载荷急剧增加,当载荷达到最大值后,在一个较小的位移内载荷急剧下降,接头开始出现断裂失效。因此,在改变焊接电流时,当点焊接头不存在焊接缺陷时[图1(c)],试件主要失效模式为基板撕裂失效,少数试件为混合失效或接头断裂失效;当接头出现焊接缺陷时[图1(d)],试件失效模式为接头断裂失效。

2.4 能量吸收分析

点焊接头能量吸收值能够反映接头的缓冲吸震能力,A1~A4组的能量吸收平均值分别为65.3、86.7、88.0、57.0 J,前3组能量吸收平均值逐渐增大,第4组相对于第3组有所减小,这是因为供给压力过大而导致焊接强度不足,使能量吸收能力减小;B1~B6组的能量吸收平均值分别为66.3、108.9、196.0、41.3 J,可以看出前3组能量吸收平均值逐渐增大,而第4组相对于第3组迅速减小,这是因为B4组出现焊接缺陷导致点焊接头强度不足,而使接头能量吸收能力较小。

当改变供给压力时,点焊接头的能量吸收能力随着焊核直径的增加先增大后减小;当改变焊接电流时,在不出现焊接缺陷的前提下,点焊接头的能量吸收能力随着焊核直径的增加而增大。因此,在保证恰当的供给压力一定时,较大的焊核直径在较高承载能力的前提下有更好的能量吸收能力,不仅能符合高强度接头质量的要求,在缓冲吸震方面也有较好的效果。

3 结论

(1)超声波水浸聚焦入射法能够观测出点焊焊核直径,测量结果为4.39~5.25 mm,比金相实测值大2.6%~5.3%,并能有效地观测出焊核内部形貌特征。

(2)当焊接电流不变时,随着供给压力(0.15~0.45 MPa)的不断增大,点焊焊核直径呈不断增大趋势,而失效载荷及能量吸收值随着相应的供给压力的

增加先增加后减小;当焊接电流为定值(4 kA),供给压力为0.15 MPa时,接头出现飞溅、焊穿等缺陷,并且在超声波C扫描图像中能够清晰地反映出来,接头失效模式为基板撕裂失效、基板未完全撕裂而接头断裂失效和接头断裂失效;当供给压力为0.45 MPa时,虽然点焊焊核直径增大,且未出现焊接缺陷,但是过大的供给压力导致接头厚度变小,影响了接头抗拉强度,接头失效模式主要为基板未完全撕裂而接头断裂失效。

(3)当供给压力不变时,随着焊接电流(4~8 kA)的不断增大,接头的失效载荷及能量吸收值随着焊接电流的增加而增大,同时反映在C扫描图像上的焊核直径也是逐渐增大的,接头主要失效模式为基板撕裂失效;当供给压力为定值(0.4 MPa),焊接电流为9 kA时,在C扫描图像上反映出焊穿、飞溅等典型的焊接缺陷,此时接头的失效载荷及能量吸收值急剧下降,失效模式为接头断裂失效。

参考文献

- [1] FERRASSE S, VERRIER P, MEESEMAECKER F. Resistance spot weld ability of high strength steel for use in car industry[J]. *Welding in the World*, 1998(41): 177-195.
- [2] 张鹏贤, 张志芬, 陈剑虹, 等. 电阻点焊接头外观缺陷的诊断模型[J]. *焊接学报*, 2011, 32(4): 5-8.
- [3] REVERDY F, HOPKINS D. Inspection of spot welds using a portable ultrasonic phased-array system[C]. *Colorado Sch Mines, Golden: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2005: 1212-1219.
- [4] REVERDY F, HOPKINS D. Inspection of spot welds using an ultrasonic phased array[C]. *Green Bay: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2004: 801-808.
- [5] 林建平, 胡琦, 王立影, 等. USIBORI500 超高强度淬火钢板点焊性能研究[J]. *中国工程机械学报*, 2007, 5(3): 317-321.
- [6] 陈益平, 邵景辉, 胡德安, 等. 镁/钢异种材料点焊接头力学性能及显微组织分析[J]. *焊接学报*, 2013, 34(4): 101-104.
- [7] 韩立军, 谷净巍, 张正林. 超高强淬火钢板中频点焊接头组织与断口形貌[J]. *焊接学报*, 2010, 31(4): 101-104.
- [8] 史立丰, 郑祥明, 史耀武. 超声C扫描检测铝合金电阻点焊的焊核直径[J]. *无损检测 NDT*, 2004, 26(1): 34-36.
- [9] 陈振华, 史耀武, 赵海燕. 薄镀锌钢板点焊超声成像分析[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(12): 274-278.