

2024 铝合金薄板搅拌摩擦焊接头 缺陷超声无损检测

王波¹,高双胜²,马明²

(1. 江苏烁石焊接科技有限公司,江苏 南京 211135; 2. 常州工学院 航空与机械工程学院,江苏 常州 213032)

摘要:采用自制相控阵超声探头对薄板铝合金搅拌摩擦焊接头进行无损检测,通过金相试验分析,验证焊接接头存在隧道、孔洞和未焊透等典型缺陷。结果表明,自制相控阵超声探头能较好地检测出搅拌摩擦焊接头中隧道、孔洞和未焊透缺陷,从前进侧入射超声对典型缺陷的检测效果优于后退侧入射。

关键词:搅拌摩擦焊;典型缺陷;薄板铝合金;相控阵超声;无损检测

中图分类号:TG115.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)05-0054-03

Study of Ultrasound Nondestructive Detection of Friction Stir Welded Joint of 2024 Aluminum Alloy Sheet

WANG Bo¹, GAO Shuangsheng², MA Ming²

(1. Jiangsu Shuoshi Welding Technology Co., Ltd., Nanjing 211135, China;

2. School of Aviation & Mechanical Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China)

Abstract: Because the defects exist in the nondestructive testing method for friction stir welded joints of aluminium alloy sheet, this paper uses a self-developed phased array ultrasonic probe in its detection. Through the metallographic analysis, the typical defects, such as tunnels, holes and incomplete penetration, exist in the welded joint. The results show that the self-developed phased array ultrasonic probe can be used to detect such defects. The effect of using forward-side incident ultrasound for the typical defect detection is better than that of using backward-side incident ultrasound.

Keywords: friction stir welding; typical defects; aluminum alloy sheet; phased array ultrasound; nondestructive testing

0 引言

搅拌摩擦焊是 20 世纪 90 年代英国焊接研究所发明的,该方法对塑性优良的铝、镁、铜合金的焊接,比熔焊方法具有明显的优势。熔焊过程易产生中气孔、裂纹、合金元素蒸发等缺陷和不足,搅拌摩擦焊属于固相焊,可有效避免上述缺陷,但焊接过程中偶遇设备不稳定导致工艺参数波动,或工装长期服役发生变形,尤其是垫板长期受冷热循环,将导致焊接接头产生孔洞、隧道、疏松、根部未焊透、弱结合等缺陷,这些缺陷形貌与熔焊缺陷差别明显,具有分散、紧贴、角度多变等特征。

科研工作者针对搅拌摩擦焊典型缺陷的成因和检测展开了大量的研究,王常玺^[1]等研究了一种铝合金薄板搅拌摩擦焊焊缝的超声快速检测方法,其运用超声 C 扫描达到自动检测;LEGAND 等^[2]研发了一种利用多角度入射聚焦声束在焊缝处检测方法,对搅拌摩擦焊接头进行检测,取得良好的声波反射效果;马宏伟等^[3]利用分割阵元叠加和近似方法求解矩形换能器空间脉冲响应,快速准确地计算偏转范围内的相控阵声场;郑德根等^[4]研究了

激光超声的铝合金搅拌摩擦焊典型缺陷的检测,通过 X 射线与激光超声检测的对比,发现了激光超声可以准确识别搅拌摩擦焊中未焊透、隧道空洞等缺陷。

就目前搅拌摩擦焊典型缺陷检测的研究情况来看,检测厚度下限是 5 mm,对于低于 5 mm 的薄板检测还鲜见报道,因此有必要开展薄板搅拌摩擦焊典型缺陷的无损检测。铝合金薄板在工业生产中应用广泛,其中航空工业较为典型,由于对零部件的质量比较敏感,因此大量使用比强度和性价比均较高的铝合金薄板。本文即是针对航空工业常用的 2024 铝合金薄板进行的,以期将取得的成果推广到其他行业。

1 试验方法

实验材料为 300 mm×100 mm×3.2 mm 的 2024A-T3 铝合金轧制板材,采用对接接头形式,材料的质量分数见表 1。

表 1 2024A-T3 的质量分数 单位:%

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn
3.8~4.8	1.2~1.8	0.3~0.9	<0.5	<0.5	<0.3

基金项目:国家自然科学基金项目(61727802)

作者简介:王波(1977—),男,辽宁铁岭人,工程师,硕士研究生,主要从事焊接无损检测、焊接工艺、焊接数字化研究应用与技术推广。

焊接实验是在某公司制造的型号为 FSW-3LM-4012 宽幅小型搅拌摩擦焊设备上完成的,采用锥型带螺纹搅拌头,轴肩直径 10mm,搅拌针长 2.9mm。本试验研究了搅拌头旋转速度、行进速度、下压量 3 个参数对焊接接头内部质量的影响。为了获得典型缺陷试样,焊接参数设置有意偏离正常值,其中为了获得未焊透缺陷,将搅拌针端部磨掉 0.1 mm。

使用某公司生产的相控阵探伤仪 ISONIC2009 进行无损检测,由于板的厚度较薄,因此产生的缺陷相对尺寸也较小(尤其是根部未焊透缺陷),要求入射的超声能量尽量高,并采用一次和二次波检,可减少超声在薄板内的传播路程,从而减少能量的衰减。上述情况对相控阵探头提出了较高要求,针对这一需求,设计了曲面聚焦相控阵探头,经过反复测试获得了较好的检测效果。通常相控阵超声探头的晶片排列成一个平面,经过程序控制可形成线聚焦模式,而在本研究中,采用中心频率 7.5 MHz、16 个晶片阵元排成曲面的相控阵超声探头,实现了点聚焦效果,提高了微小缺陷的检测能力。

为了验证探伤仪的缺陷检测能力,特设计制作了如图 1 所示的对比试块,其中采用横通孔、平底孔、直槽和斜槽模拟搅拌摩擦焊接容易产生的空洞、根部未焊透等典型缺陷,将焊缝首尾 30 mm 剪切掉,以保证焊缝的一致性。

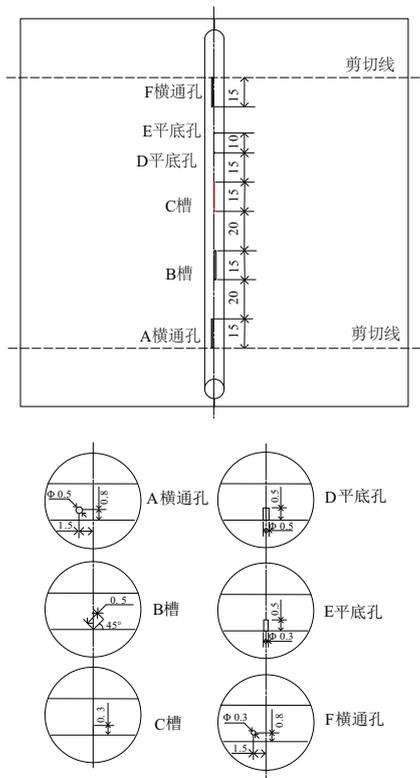


图 1 检测用对比试块

2 试验结果与分析

2.1 对比试块的检测

首先利用自制探头检测了对比试块,检测结果见图 2。对比试块上所有的人工缺陷均能较好地检测出来,其中横通孔相对容易检测,超声反射信号较强。受篇幅限

制,未列出直径 0.5 mm 横孔检测结果,其超声反射信号能量比直径 0.3 mm 横孔更强。经过对比发现从搅拌摩擦焊接头两侧入射超声,信号反射强度不同,相比而言前进侧入射信号更强,实际接头检测效果更加明显,详见下节。对人工缺陷的测量值进行了记录,见表 2,分别测量了缺陷的深度和距焊缝中心的距离,结果显示深度值测量比较准确,而与焊缝中心距离偏差相对大些,这是因为人工缺陷与焊缝中心距离设计值较小,因此偏差较大。

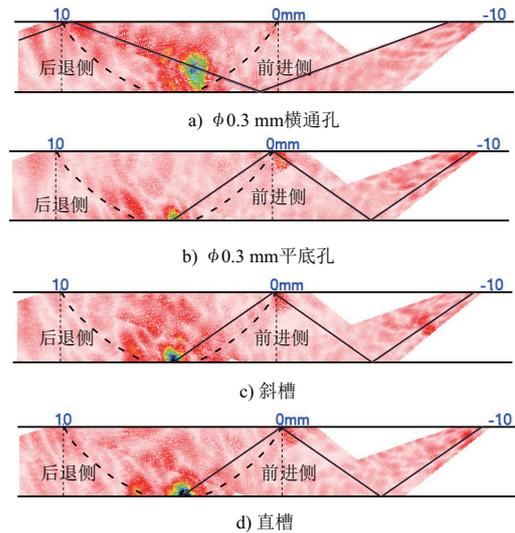


图 2 对比试块相控阵超声检测结果

表 2 对比试块人工缺陷定位误差分析 单位:mm

检测内容		人工缺陷					
		平底孔		横通孔		槽	
		φ0.3	φ0.5	φ0.3	φ0.5	直槽	斜槽
与焊缝中线距离	设计值	0.15	0.25	1.50	1.50	0	0
	测量值	0.53	0.16	1.21	1.34	0.25	0.22
深度	设计值	3.20	3.20	2.20	2.20	3.20	3.20
	测量值	3.18	3.20	2.10	2.20	3.13	3.18

2.2 搅拌摩擦焊接接头的检测与验证

经过对比试块的检测,验证了系统的检测能力。利用该系统对含典型缺陷的搅拌摩擦焊接接头进行了检测。为了验证检测结果的可靠性,对试件进行了解剖并做了金相分析,将检测图谱与金相图进行了对比验证(图 3-图 5)。从检测结果可以看出,相控阵超声能够较好地检测出孔洞、隧道、根部未焊透缺陷。超声波分别从焊缝前进侧和后退侧两侧入射进行了比较,从结果来看,超声波从前进侧入射信号要比后退侧强,其原因是超声波从后退侧入射需要经过接头的多个区(轴肩影响区、焊核区、热机影响区),一方面经过的路径长,不同区域晶粒尺寸差别大,金属流动方向变化大,因此对超声波散射严重,导致接收到的信号变弱;另一方面孔洞和隧道类缺陷多产生于前进侧,从前进侧入射超声路程相对后退侧短,能量衰减

相对小。

经过破坏性实验分析,获得了孔洞缺陷深度的检测误差为 5.1%(无损检测值 2.23 mm,金相测量值 2.35 mm),隧道缺陷深度的检测误差为 5.2%(无损检测值 2.01 mm,金相测量值 2.12 mm);超声从前进侧入射未焊透距探头前沿水平距离检测误差为 6.1%(无损检测值 10.23 mm,金相测量值 10.89 mm)。

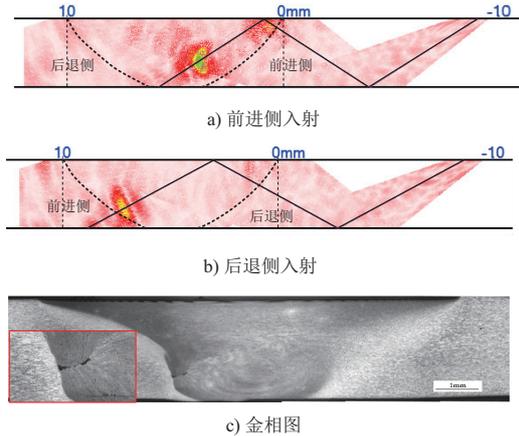


图 3 孔洞缺陷超声检测图及金相分析验证

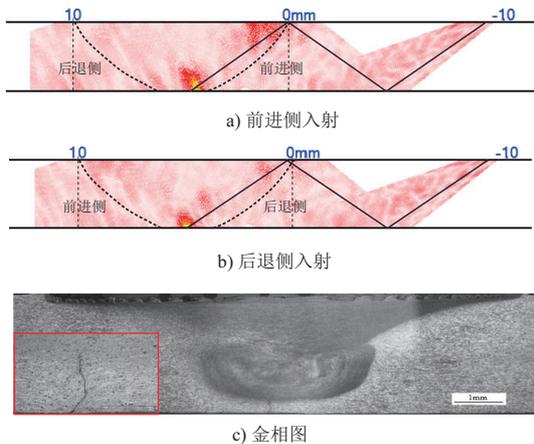


图 4 未焊透缺陷超声检测图及金相分析验证

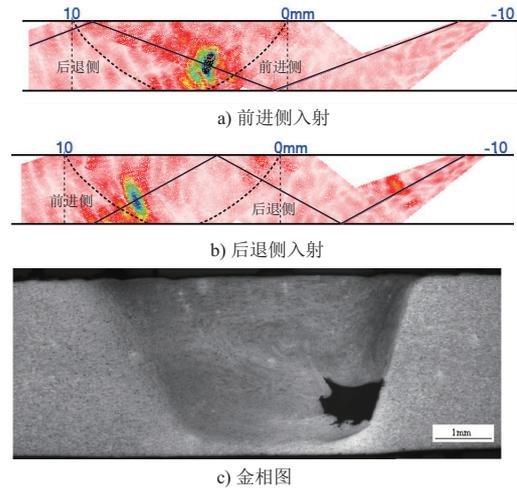


图 5 隧道缺陷超声检测图及金相分析验证

3 结语

1) 自行设计的曲面聚焦相控阵超声探头,可较好地实现薄板铝合金搅拌摩擦焊接头典型缺陷即孔洞、未焊透、隧道的无损检测。

2) 从前进侧入射超声对典型缺陷的检测效果优于后退侧入射。

3) 经过破坏性实验分析,孔洞缺陷深度的检测误差为 5.1%,隧道缺陷深度的检测误差为 5.2%,超声从前进侧入射未焊透缺陷距探头前沿水平距离检测误差为 6.1%。

参考文献:

[1] 王常玺,刚铁,于朋,等. 一种铝合金薄板搅拌摩擦焊缝的超声快速检测方法[J]. 机械工程学报, 2015,51(2):7-13.

[2] Santos T G D, Silva B S, Santosvilaa, et al. Data fusion in non destructive testing using fuzzy logic to evaluate friction stir welding[J]. Welding International, 2008, 22(12): 826-833.

[3] 马宏伟,董明,陈渊,等. 基于矩形换能器空间脉冲响应的相控阵声场研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(18):36-42.

[4] 郑德根,陈华斌,王继锋,等. 激光超声的铝合金搅拌摩擦焊典型缺陷检测及分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(7):35-38.

收稿日期:2019-07-24

(上接第 38 页)

参考文献:

[1] M·H·伊万诺夫. 谐波齿轮传动[M]. 北京:国防工业出版社, 1987: 1-7.

[2] 付军锋,董海军,沈允文. 谐波齿轮传动中柔轮应力的有限元分析[J]. 中国机械工程, 2007, 18(18): 2210-2212.

[3] Huimin Dong, Delun Wang. Elastic deformation characteristic of the flexspline in harmonic drive[C]. ASME, 2010: 52-57.

[4] Xiaoxia Chen, Yusheng Liu, Jingzhong Xing. A novel method based on mechanical analysis for the stretch of the neutral line of the flexspline cup of a harmonic drive[J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 76: 1-19.

[5] 董惠敏,李德举,齐学书. 基于正交试验和有限元分析的谐波

传动柔轮杯体结构优化[J]. 机械传动, 2013; 37(1): 34-36.

[6] 董惠敏. 基于柔轮变形函数的谐波齿轮传动运动几何学及其啮合性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008: 27-29.

[7] 周辉. 机电伺服系统中高过载谐波齿轮传动承载特性的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2011: 26-29.

[8] 董惠敏,张春懋. 齿啮式谐波传动柔轮负载变形函数及齿形修正的研究[J]. 机械传动, 2011, 35(7): 7-11.

[9] 陈鹏,范元勋. 基于 Matlab 的谐波齿轮及其刀具的设计与仿真[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016, 1(1): 11-13.

[10] 王敏杰. 高承载谐波齿轮传动设计与制造技术的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2015: 45-46.

收稿日期:2018-05-29