

基于相控阵超声的铝合金熔焊缝缺陷深度定位技术研究

李来平 周建平 危 荃

(上海航天精密机械研究所,上海 201600)

文 摘 传统的射线照相检测技术仍是铝合金熔焊缝缺陷的主要检测方式,由于传统射线照相检测无法测量缺陷在焊缝高度方向上的尺寸和位置,在缺陷的定位和排除方面存在不足,从而加大缺陷排除的工作量,甚至由于缺陷排除方向错误造成焊缝挖穿,影响补焊质量。相控阵超声检测技术通过接收缺陷回波来实现缺陷检测,可以反映缺陷的尺寸和位置信息。本文采用 Omni Scan MX 相控阵超声检测仪和 5L64-A2 相控阵探头针对对比试块、铝合金熔焊缝缺陷进行了定位技术研究,并与缺陷微观测量、宏观测量的结果进行对比,结果表明基于相控阵超声检测的铝合金熔焊缝缺陷深度定位检测结果与微观检测结果基本一致,可以采用相控阵超声检测技术进行铝合金熔焊缝缺陷深度定位。

关键词 相控阵超声,铝合金熔焊缝,缺陷深度定位

中图分类号: TG441.7

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.05.016

Research on Flaw Depth Positioning of Aluminum Alloy Melting Welding Seam Based on Ultrasonic Phased Array

LI Laiping ZHOU Jianping WEI Quan

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600)

Abstract The traditional conditional radiography testing, which is the main testing technology of welding seam, can not gain the size and position in the welding seam height. Therefore the disadvantage increases the workload of eliminating flaw and affects repairing welding quality. The phased array ultrasonic technology can detect flaw size and position by flaw echo wave. The positioning technology of reference test pieces and aluminum alloy melting welding seam is studied by the Omnisacn MX phased array ultrasonic and 5L64-A2 detector. The research result, microscopic measurement and macroscopic measurement are contrasted. The result shows that measurement of phased array ultrasonic, microscopic and macroscopic is uniform, thus the phased array ultrasonic can be used to detect the flaw position of aluminum alloy melting welding seam.

Key words Ultrasonic phased array, Aluminum alloy melting welding seam, Flaw depth positioning

0 引言

运载火箭贮箱是大直径薄壁焊接结构,印度运载火箭、俄罗斯运载火箭贮箱及上面级、美国运载火箭贮箱、欧空局的阿里安 5 系列、日本的 H-2 系列和中国运载火箭贮箱采用 5A06、2A14、2219、2195 等牌号的铝合金。美国的宇宙神 5 系列、俄罗斯运载火箭及

上面级、欧空局的阿里安 5 系列、印度的运载火箭液体贮箱和中国的现役运载火箭贮箱采用钨钨惰性气体保护焊接技术。美国德尔它 2 系列、德尔它 4 系列、法尔肯系列一子级和中国的新一代运载火箭贮箱环缝采用变极性等离子弧焊接技术。美国德尔它 2 系列、德尔它 4 系列、法尔肯系列一子级贮箱筒段纵

收稿日期: 2014-05-29

作者简介:李来平,1974 年出生,博士,研究员,主要从事航天产品焊接、无损检测技术研究。E-mail:llp117@126.com

缝、日本的 H-2 贮箱纵环缝、中国新一代运载火箭贮箱纵缝采用搅拌摩擦焊接工艺。综上所述,国内外运载火箭贮箱主要采用铝合金熔化焊结构^[1]。在运载火箭贮箱制造过程中需要对发现的气孔、夹杂、裂纹、未熔合、未焊透等超标缺陷进行排除并补焊。运载火箭贮箱主要采用传统的射线照相检测技术。射线照相检测技术不能确定缺陷深度位置和大小信息,在实际生产中对缺陷排除时往往靠经验判断从焊缝正面还是反面挖补,有时方向判断错误造成挖补深度过深,当缺陷出现在背面余高处时有可能导致焊缝挖穿,在补焊时容易烧穿,不仅增加了缺陷排除的工作量,更重要的是影响补焊质量。

超声波检测通过接收缺陷回波来实现缺陷检测,反映缺陷的尺寸和缺陷的位置。相控阵超声检测技术从 20 世纪 90 年代起主要用于航空部件、低压涡轮部件检测、核电设备焊缝检测、承压设备焊缝、长输管线的环焊缝检测、固体火箭发动机封头粘接结构、复合材料粘接等^[2-5]。

本文采用 Omni Scan MX 相控阵超声检测仪和 5L64-A2 相控阵探头对设计的对比试块进行了定位技术研究,针对铝合金熔焊缝缺陷进行定位检测,并与缺陷微观测量、宏观测量的结果进行对比,结果表明采用相控阵超声检测的铝合金熔焊缝缺陷深度定位检测结果与微观检测结果基本一致。

1 基于相控阵超声检测的缺陷深度定位技术

1.1 相控阵超声检测原理

相控阵超声检测技术通过控制换能器阵中各阵元的激励(或接收)脉冲的时间延迟,改变由各阵元发射(或接收)声波到达(或来自)物体某点时的

表 1 相控阵探头技术规格

Tab. 1 Technical specifications of UPA detector

型号	晶片排列方式	晶片间距/mm	楔块型号	晶片宽度/mm	楔块安装方式	晶片长度/mm	耦合剂
5L64-A2	线形排列	1	SA2-N55S-IHC	1	正常安装	9	机油



图 1 5L64 探头及楔块实物图

Fig. 1 5L64 detector and wedge

1.4 对比试块

对比试块主要是用来测试和校验探伤仪及探头的性能、确定探伤灵敏度、调节探测范围、确定缺陷位置

相位关系,达到聚焦和声束偏转的效果,实现声成像的技术。相控阵超声检测技术可获得二维扫描实时图像,图像显示特征取决于缺陷几何形状和缺陷相对于超声探头的取向。常规超声的定量方法为在同一扫查灵敏度的基准上,将检测到的缺陷回波高度与标准反射体校准时的回波高度都降至 80% 满屏波高,取其增益差值作为当量大小。而在相控阵超声方法中,由于相控阵的二维可视性,可通过计算缺陷端面的差值计算缺陷大小。通过优化调整聚焦法则能够确定一个深度范围内的缺陷深度位置。

1.2 相控阵超声检测仪

Omni Scan MX 相控阵超声检测仪是一种新型便携式模块化无损检测仪,综合了超声波相控阵、线性和扇形扫查、常规超声波技术和涡流阵列等无损检测技术,允许用户在现场根据需要更换不同的检测模块。Omni Scan MX 相控阵超声检测仪相控阵超声软件具备全功能 C 扫描、B 扫描、A 扫描功能和全功能扇形扫描、高级实时数据处理。

1.3 相控阵超声检测探头

相控阵超声探头是由若干个阵元按照一定方式排列组成的,它辐射的声场是由各个阵元共同作用的结果。相控阵探头由多个相同的晶片阵元构成,每个晶片阵元可视能为辐射柱面波的线状波源或球面波的点状波源。通过计算机控制相控阵探头晶片的激励(振幅与延时)。使各阵元声波到达设定的焦点时具有相同的相位,形成特定的可变换的超声声场,实现某些方式的超声波扫描(如扇形扫描、线形扫描),并按相应程序,接收反射波,实现对缺陷的检测。探头参数如表 1 所示,探头及楔块实物如图 1 所示。

等等,设计了埋深 5 ~ 35 mm、深度方向间距 5 mm、直径为 $\Phi 0.8$ mm 横穿孔来校准相控阵超声检测的精度。图 2 是铝合金相控阵超声检测的标准试块实物图。

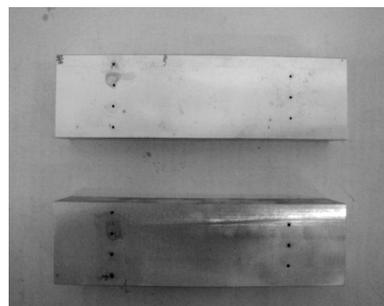


图 2 相控阵超声检测对比试块实物图

Fig. 2 Reference test pieces of UPA

1.5 缺陷深度定位技术研究

研究在不同聚焦深度法则下波幅增益的变化规律。

按表 2 中参数设置聚焦法则,通过改变聚焦深度

表 2 聚焦法则
Tab.2 Focusing rule

扫描类型	聚焦类型	探头起点	聚焦距离 /mm	探头 PRF	增益值 /dB	开始角度 /(°)	结束角度 /(°)	开始距离 /mm	结束距离 /mm
扇形扫描	恒定位移	探头前沿	6	40	21.80	30	70	1.98	9.92

表 3 的行中表示聚焦深度,列中表示横通孔的埋深,表格中的内容表示将孔的回波调整到 80% 满屏幅度所需要的增益值。

表 3 不同聚焦深度的增益变化

Tab.3 Gain variation of different focusing depth

孔深/mm	5mm	10mm	15mm	20mm	25mm	30mm	35mm
5	23	25	29	32	32	32	31
10	22	20	22	25	26	25	26
15	25	23	24	26	27	28	27
20	31	26	28	25	27	27	26
25	31	27	29	28	29	29	29
30	39	33	32	35	30	30	30
35	37	32	34	32	33	32	32

从表 3 的检测结果显示:

(1) 聚焦深度设置的与孔的埋深相等时,此时的检测灵敏度最高,所需的增益最低;

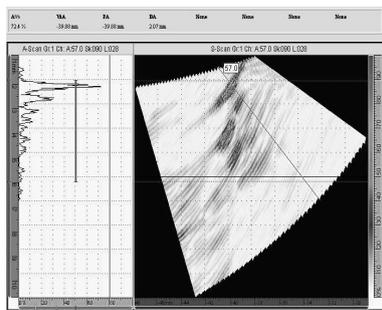
(2) 聚焦深度在 20 mm 内时,随着孔的位置越来越深,增益的递增量越明显,大于 20 mm 时,随着孔深的加大,检测灵敏度较平稳,波幅变化不明显。

标准横通孔定位结果见表 4,检测结果图像见图 3。

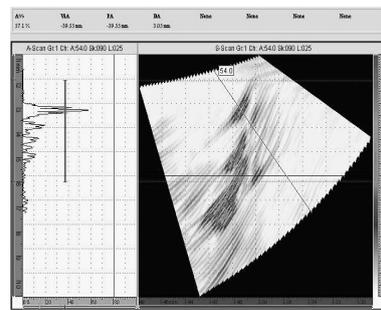
表 4 横通孔定位结果对比

Tab.4 Position of cross through hole

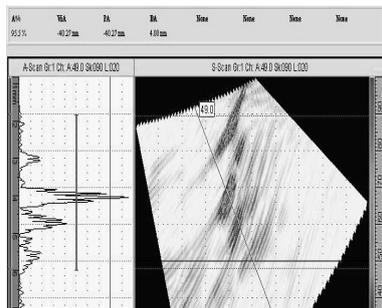
标准孔深度/mm	实际检测深度/mm
2	2.17
3	3.15
4	4.12
5	4.88
10	10.13
15	14.82
20	20.14
25	24.81
30	30.18



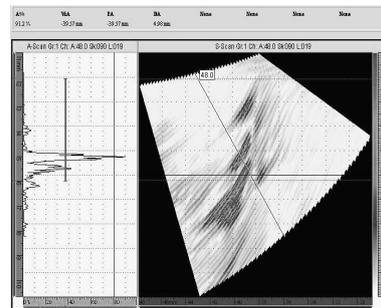
(a) 2 mm 深孔



(b) 3 mm 深孔



(c) 4 mm 深孔



(d) 5 mm 深孔

图 3 不同深度通孔的相控阵检测图像

Fig.3 UPA image of different depth through hole

深度指示数值为指针指向缺陷图像显示最高幅值时的数值,可以看出,相控阵超声检测的缺陷深度与实际测量深度误差约为在 0.2 mm,即采用相控阵超声检测技术检测的深度与标准孔深度基本一致。

2 相控阵超声技术在铝合金熔焊缝缺陷深度定位分析

利用相控阵超声能有效检测缺陷深度功能,使用相控阵超声对需要挖补缺陷进行定位检测,然后决定缺陷挖补方向,在实际应用之前,先用相同焊接工艺参数及铝合金板材焊接试板,对试板进行 X 射线检测,找到超标缺陷后应用相控阵超声对缺陷深度定位检测,再通过挖补或线切割手段,测量缺陷实际深度,比较两者之间误差。

铝合金板材焊接试验材料为 2219 铝合金,尺寸为 200 mm×100 mm×6 mm,焊接方法为自动变极性钨极氩弧焊接方法,焊接接头形式为 Y 型对接接头,焊接钝边为 2 mm,焊接坡口为 30°,填充焊丝材料为 2319 铝合金,焊丝直径为 $\Phi 1.6$ mm。经 X 射线检测试板有一处大小 1.5 mm 的气孔。焊接试板气孔缺陷测量方法包括相控阵超声检测、电子显微镜测量和直尺宏观测量,相控阵超声测量采用 Omni Scan MX 相控阵超声检测仪、5L64-A2 相控阵探头和表 2 确定

的聚焦法则实现无损检测;在焊接试板的缺陷处用线切割方法进行破坏,然后采用 Olympus B×51M 光学显微镜和直尺进行测量。

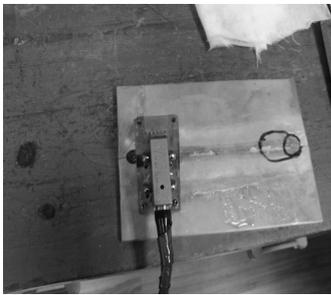
表 5 是焊接试板气孔缺陷相控阵测量检测深度、微观检测深度与宏观测量深度比较。图 4 是铝合金焊接试板相控阵检测实物图及检测结果图,可以看出,缺陷深度的检测值与微观测量值、宏观测量值基本一致。

某运载火箭贮箱筒段纵缝 X 射线检测发现裂纹缺陷的现象,在缺陷挖补前首先用相控阵超声对该裂纹进行定位检测,检测前将焊缝外表面余高打磨至与基本金属表面齐平,检测时相控阵超声探头声束从筒段焊缝外表面入射,相控阵超声检测裂纹深度 6.2 mm(板材厚度 6.0 mm,背面余高约 1 mm),即裂纹缺陷位于筒段内表面的余高上,排除缺陷时打磨掉焊缝内表面余高,肉眼可见到裂纹缺陷,打磨结束后经射线检测合格。

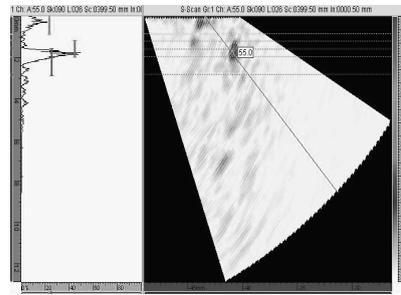
表 5 试板缺陷检测深度与实际深度

Tab.5 Detect depth and real depth of flaw

相控阵测量/mm	微观测量/mm	宏观测量/mm
1.73	2.11	1.92



(a) 铝合金焊接试板相控阵检测实物图



(b) 缺陷相控阵超声检测图

图 4 铝合金熔焊缝气孔缺陷测量结果对比

Fig.4 Measurement result of gas porosity flaw of aluminum alloy melting welding seam

3 结论

针对铝合金熔焊缝缺陷深度定位无法采用 X 射线检测技术定位问题,采用横通孔对比试块确定合适的聚焦法则,对焊接试板缺陷进行相控阵超声检测,检测结果表明气孔缺陷的相控阵超声检测与缺陷微观测量、宏观测量的结果基本一致,相控阵超声检测技术可以用于铝合金熔焊缝缺陷深度定位检测。

参考文献

[1] 李来平,陈杰,徐爱杰.国内外运载火箭贮箱材料及焊接技术发展现状与趋势分析[J].中国航天科技集团公司科技委 2013 年年会暨学术报告会文集,2013:314-318

[2] 金南辉,牟彦春.小径管对接焊接接头相控阵超声检测技术[J].无损检测,2010,32(6):427-430

[3] 曹健.全自动相控阵超声检测技术在环焊缝检测中的应用[J].无损检测,2003,25(4):201-203

[4.] 陈友兴,王召巴,赵霞,等.固体火箭发动机封头界面粘接相控阵超声检测技术可行性研究[J].固体火箭技术,2008,31(4):417-420

[5] 江文文,柏逢明.航空发动机涡轮叶片相控阵超声检测研究[J].长春理工大学学报,2011,34(4):66-69

(编辑 任涛)