

# 空分设备铝合金焊接接头的相控阵超声检测

黄文大<sup>1,2</sup>, 王诗毅<sup>1</sup>, 毛 炜<sup>3</sup>, 胡德友<sup>3</sup>, 梁 全<sup>3</sup>

[1. 浙江省特种设备科学研究院, 杭州 310020; 2. 浙江省特种设备安全检测技术研究重点实验室, 杭州 310020; 3. 盈德气体工程(浙江)有限公司, 湖州 313200]

**摘 要:** 介绍了相控阵超声检测技术在空分设备铝合金焊接接头检测中的一些工艺参数, 归纳了各种缺欠的相控阵图谱信号特征, 并将相控阵超声检测结果与射线检测结果进行了对比。结果表明, 相控阵超声检测方法更高效、环保, 为工程应用提供了支持。

**关键词:** 相控阵; 铝合金焊接接头; 射线检测; 比较

中图分类号: TG115.28      文献标志码: B      文章编号: 1000-6656(2024)05-0080-03

## Phased array ultrasonic testing of air separation plant aluminum alloy welded joints

HUANG Wenda<sup>1,2</sup>, WANG Shiyi<sup>1</sup>, MAO Wei<sup>3</sup>, HU Deyou<sup>3</sup>, LIANG Quan<sup>3</sup>

(1. Zhejiang Academy of Special Equipment Science, Hangzhou 310020, China;

2. Key Laboratory of Safety Testing Technology for Special Equipment in Zhejiang Province, Hangzhou 310020, China;

3. Yingde Gases Engineering (Zhejiang) Co., Ltd., Huzhou 313200, China)

**Abstract:** This paper briefly described the phased array ultrasonic testing technology as well as some technological requirements and phased array signal characteristics of imperfections. It gave the comparison of the results by using phased array ultrasonic testing and radiographic testing. The results showed that phased array ultrasonic detection method is more efficient and environmentally friendly, which provides support for engineering application.

**Key words:** phased array; aluminum alloy welded joint; radiographic testing; comparison

空分设备是以空气为原料, 通过压缩循环深度冷冻的方法将空气变成液态, 再通过精馏从液态空气中逐步分离生产出氧气、氮气及氩气等惰性气体的设备。空分设备大多为塔器, 塔高可达 60 余米, 制造需分段出厂, 并在现场组焊。组焊后的塔段, 因内部有管道(如降液管)等部件的遮挡(见图 1), 无法对组焊接头进行双壁单影的射线检测。相控阵超声检测(PAUT)技术使用阵列探头和相应延迟法则控制晶片的激发时间和激发次序, 通过电子扫描实现声束移动、偏转和聚焦等功能, 对于不同取向的缺欠均具有良好的检出率<sup>[1]</sup>。使用相控阵超声检测, 可以确保焊缝 100 % 检测。与传统射线检测(RT)

方法比较, 相控阵超声检测方法安全无辐射, 无需隔离或防护, 有效保障工程进度, 提升检测效益, 更高效、环保。

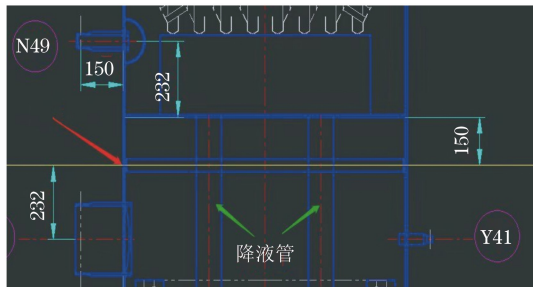


图 1 两塔段对接焊缝处的内部遮挡示意

### 1 PAUT 检测工艺

铝合金焊接接头相控阵检测与碳钢焊接接头相控阵检测相比, 声能衰减小, 铝合金横波声速(约 3 120 m · s<sup>-1</sup>) 小于碳钢中的横波声速(约

收稿日期: 2023-11-27

作者简介: 黄文大(1968—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事特种设备检验及射线、TOFD、PAUT 无损检测研究工作

通信作者: 黄文大, hwdfox@163.com

3 230 m·s<sup>-1</sup>), 铝合金焊接接头检测用的标准试块和对比试块应使用与现场相同牌号的材料制作。

1.1 厚度为 5 mm 的接头 PAUT 检测工艺

探头型号为 10L32-0.375×10-A6-P, 频率为 10 MHz, 晶片总数为 32, 相邻两阵元中心间距为 0.375 mm, 激发孔径长度为 12 mm, 楔块型号为 SA6-68S(42°), 扫描类型为扇扫描, 纵向垂直扫查(初始角度为 50°, 终止角度为 72°, 角度步进值为 0.5°), 声束数量为 45, 聚焦类型为深度聚焦, 聚焦深度为 20 mm, 探头前端距为 11 mm, 定量线灵敏度  $\phi 2$  mm—12 dB。厚度为 5 mm 的对接接头声束覆盖范围如图 2 所示。

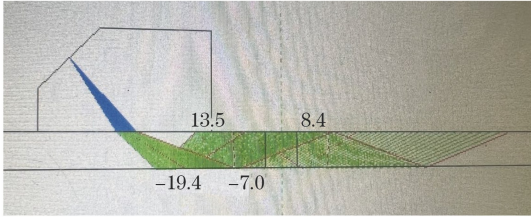


图 2 厚度为 5 mm 的对接接头声束覆盖范围

1.2 厚度为 10 mm 的接头 PAUT 检测工艺

探头型号为 5L32-0.6×10-A30-P, 频率为 5 MHz, 晶片总数为 32, 相邻两阵元中心间距为 0.6 mm, 激发孔径长度为 19.2 mm, 楔块型号为 SA30-60S-C(37°), 扫描类型为扇扫描, 纵向垂直扫查(初始角度为 40°, 终止角度为 75°, 角度步进值为 0.5°), 声束数量为 71, 聚焦类型为深度聚焦, 深度聚焦距离为 20 mm, 探头前端距为 10 mm, 定量线灵敏度为  $\phi 2$  mm—12 dB。厚度为 10 mm 的对接接头声束覆盖范围如图 3 所示。

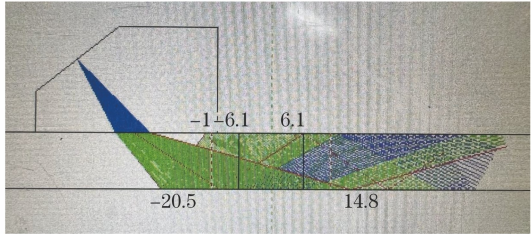


图 3 厚度为 10 mm 的对接接头声束覆盖范围

1.3 厚度为 30 mm 的接头 PAUT 检测工艺

探头型号为 5L32-0.6×10-A30-P, 频率为 5 MHz, 晶片总数为 32, 相邻两阵元中心间距为 0.6 mm, 激发孔径长度为 19.2 mm, 晶片尺寸为 10 mm, 楔块型号为 SA30-60S-C(37°), 扫描类型为扇扫描, 纵向垂直扫查(初始角度为 37°, 停止角度为 72°, 角度步进值为 0.5°), 声束数量为 71, 聚焦类

型为深度聚焦, 深度聚焦距离为 60 mm, 探头前端距为 50 mm, 定量线灵敏度为  $\phi 2$  mm—12 dB。其声速覆盖范围如图 4 所示。

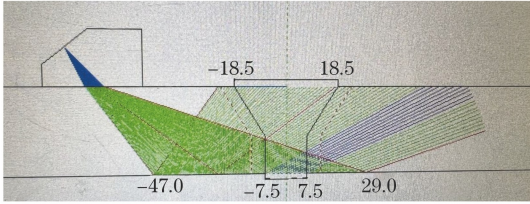


图 4 厚度为 30 mm 的对接接头声速覆盖范围

2 PAUT 与胶片照相射线检测的结果对比

铝合金焊接可能产生气孔、未熔合、未焊透、裂纹等焊接缺欠。

未焊透: 试板编号为 SA21, 厚度为 30 mm。编号为 SA21-2 的射线底片扫描结果如图 5 所示。SA21 的相控阵扫查图谱如图 6 所示。检测结果比较如表 1 所示。

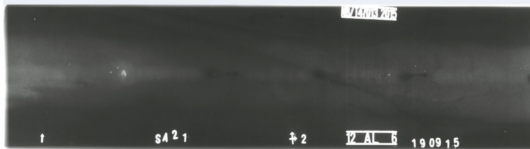


图 5 SA21-2 的射线底片扫描结果

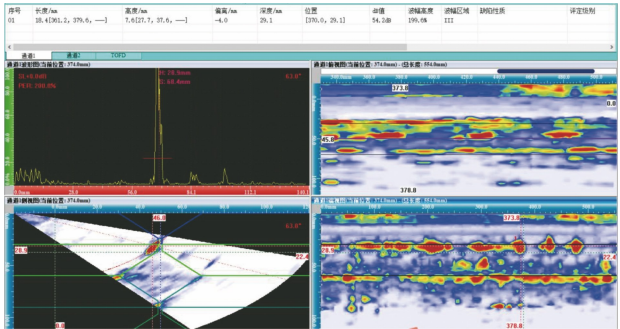


图 6 SA21 的相控阵图谱

表 1 SA21 试板的检测结果比较 mm

检测方法	缺欠长度	缺欠深度	缺欠自身高度
RT	18.0	—	—
PAUT	18.4	29.1	7.6

裂纹: 试板编号为 SA25, 厚度为 10 mm。编号为 SA25-1 的射线底片扫描结果如图 7 所示。SA25 的相控阵扫查图谱如图 8 所示。检测结果比较如表 2 所示。

圆缺(气孔): 试板编号为 SA6, 厚度为 10 mm。编号为 SA6-1 的射线底片扫描结果如图 9 所示, 其中缺欠 1 为密集气孔, 缺欠 2 为单个气孔。SA6 的相控阵扫查图谱如图 10, 11 所示。检测结果比较如



表 3,4 所示。

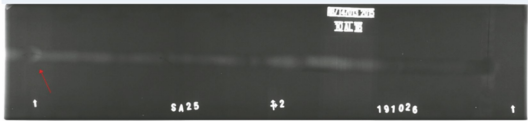


图 7 SA25-1 的射线底片扫描结果

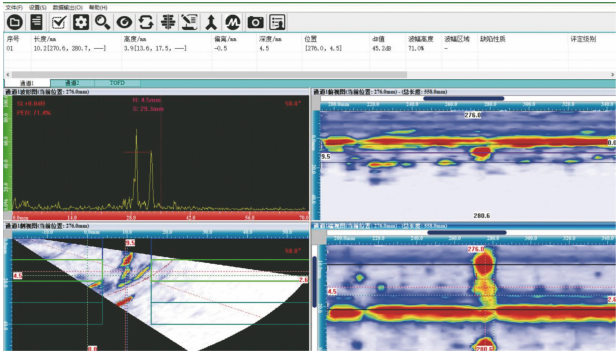


图 8 SA25 的相控阵图谱

表 2 SA25 试板的检测结果比较 mm

检测方法	缺欠长度	缺欠深度	缺欠自身高度
RT	11.0	—	—
PAUT	10.2	4.5	3.9



图 9 SA6-1 的射线底片扫描结果

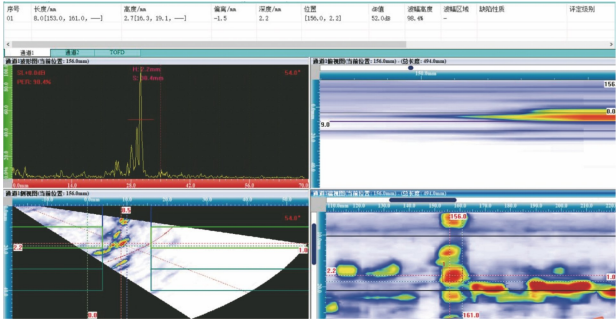


图 10 SA6 的相控阵图谱(缺欠 1)

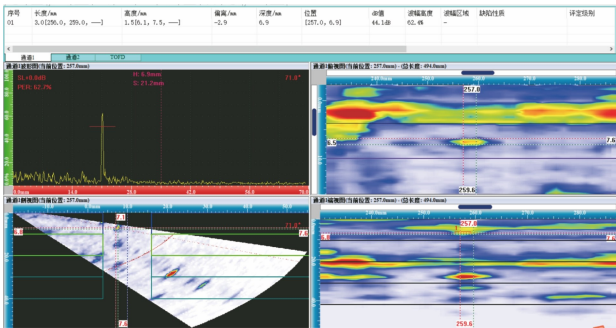


图 11 SA6 的相控阵图谱(缺欠 2)

表 3 SA6 试板缺欠 1 的检测结果比较 mm

检测方法	缺欠长度(点数)	缺欠深度	缺欠自身高度
RT	10(10 点)	—	—
PAUT	8(很难计点数)	2.2	2.7

未熔合:试板编号为 SA13,厚度为 5 mm。编号为 SA13-1 的射线底片扫描结果如图 12 所示,SA13 的相控阵扫描图谱如图 13 所示。检测结果比较如表 5 所示。

表 4 SA6 试板缺欠 2 的检测结果比较 mm

检测方法	缺欠长度(点数)	缺欠深度	缺欠自身高度
RT	2(1 点)	—	—
PAUT	3(1 点)	6.9	1.5

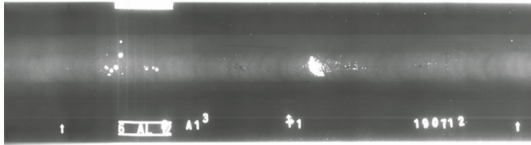


图 12 SA13-1 的射线底片扫描结果

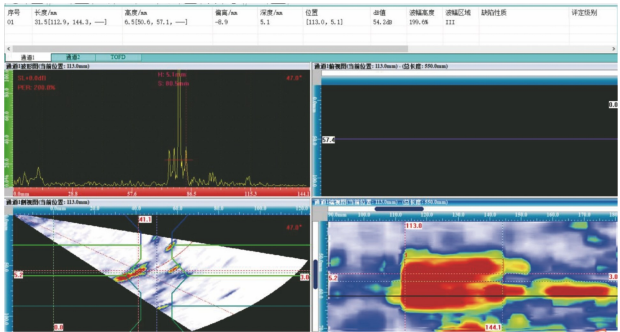


图 13 SA13 的相控阵图谱

表 5 SA13 试板的检测结果比较 mm

检测方法	缺欠长度(长径)	缺欠深度	缺欠自身高度
RT	31.0	—	—
PAUT	31.5	5.1	6.5

### 3 各类缺欠图谱特征分析

裂纹信号通常具有较强的方向性,在焊缝两侧扫描时,可能两侧都有回波;也可能一侧有回波,另外一侧无缺欠回波信号或回波信号较低。裂纹的 A 扫描信号呈锯齿状,有多个波峰,且根部有多余的小峰。当其自身高度大于单层焊道的高度时,大多为裂纹。

坡口未熔合,在 S 形扫查图中显示在坡口处,缺欠波幅平滑,A 扫描根部无多余波峰,由于超声波受缺欠角度影响较大,焊缝两侧扫查结果相差较大。

未焊透的图谱较易识别,在焊缝两侧都能检测到,在 S 形扫查中,缺欠位于焊缝根部,反射信号的

(下转第 88 页)

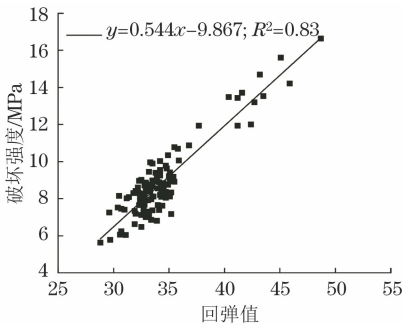


图8 112块RPC盖板表面回弹值与破坏强度关系

式中: $x$ 为RPC盖板表面回弹值; $y$ 为RPC盖板破坏强度。

### 3 结论

(1) 表面硬度法、回弹法、超声波法、剪压值均无法有效表征RPC盖板的开裂强度,且与盖板开裂强度线性相关性较低。

(2) 表面硬度法、回弹法、超声波法、剪压值与RPC盖板破坏强度线性相关性较好。RPC盖板表面硬度值与破坏强度相关系数为0.61;表面回弹值与破坏强度相关系数分别为0.16,0.69,0.82;超声波波速与破坏强度相关系数为0.78;剪压值与破坏强度的相关系数为0.72。其中砂浆回弹仪所测回弹值与RPC盖板破坏强度线性相关系数最高,为0.82。回弹法预测RPC盖板破坏强度可行性较高。

(3) 推荐使用砂浆回弹仪测试RPC盖板表面回弹值来预测其破坏强度。线性拟合112块实际工程所用RPC盖板回弹值与破坏强度,得到回弹法预测RPC盖板破坏强度经验公式为 $y = 0.544x - 9.867$ ,其相关系数为0.83。

### 参考文献:

[1] 刘娟红,宋少民. 活性粉末混凝土——配制、性能与微结构[M]. 北京:化学工业出版社,2013.

[2] 朱博,段锋,何娟,等. 陶砂替代石英砂制备活性粉末混凝土(RPC)的性能研究[J]. 材料导报,2022,36(10):69-73.

[3] 李坤坤,杨克家,李坤梁,等. 纤维分布对活性粉末混凝土构件力学性能的影响[J]. 土木与环境工程学报,2022,44(5):197-204.

[4] 杨立云,林长宇,张飞,等. 玄武岩纤维对活性粉末混凝土受压破坏的影响[J]. 建筑材料学报,2022,25(5):483-489.

[5] 刘岩. 组合回弹法检测混凝土抗压强度研究[J]. 建筑结构,2023,53(10):91-96.

[6] 周茗如,樊乐涛,彭新新,等. 兰州地区高强混凝土回弹法测强曲线试验研究[J]. 混凝土,2016(10):158-160.

[7] 刘利先,赵岩枫,吕龙,等. 昆明地区回弹法检测混凝土抗压强度测强曲线的研究[J]. 建筑科学,2015,31(9):65-69.

[8] 沈金生,焦轼伦,李扬,等. 高强混凝土超声回弹法地区测强曲线试验研究[J]. 混凝土,2020(4):145-147.

[9] 李卫文,袁小玲,高波,等. 高温对玄武岩纤维RPC抗压强度损伤及超声探测[J]. 混凝土,2022(2):51-53,59.

[10] WASHER G, FUCHS P, GRAYBEAL B A, et al. Ultrasonic testing of reactive powder concrete[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2004, 51(2):193-201.

[11] FANG Z, ZHOU C B. Experimental study on the elastic modulus of reactive powder concrete [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(9): 128-134.



(上接第82页)

位置低于几何反射信号的,沿着焊缝长度方向移动,A扫描回波信号的波幅平滑,直线上升后先平稳然后下降,且根部无多余的小峰。

单个气孔的回波信号是单个波形,无多余波峰,沿着焊缝的长度方向移动,气孔的回波信号逐渐显现和消失。在S、C、D形扫查中呈点状,A扫描的上升和下降较平稳,自身高度小于单层焊的厚度,一般在焊缝两侧扫查图谱中都有显示,有时一次波与二次波检测到的回波波幅不同。密集气孔显示为簇状多峰。成排的气孔可能显示为单个条缺。

### 4 结论

(1) 选取适宜的探头和楔块,设置合理的聚焦法则,相控阵超声检测采用扇扫描能够对空分设备铝合金焊接接头实施有效检测。

(2) 相控阵超声检测对危害性面积型缺欠(裂纹、未熔合、未焊透)检出结果与射线检测结果基本相符,但相控阵超声检测方法更为高效、环保。

### 参考文献:

[1] 王悦民,李衍,陈和坤. 超声相控阵检测技术与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2014.