

聚焦深度及偏转角度对超声相控阵检测 定量和定位的影响

张新雷^{1,2}

(1.福建省建筑科学研究院有限责任公司, 福州 350100;

2.福建省绿色建筑技术重点实验室, 福州 350100)

摘要: 聚焦与偏转是超声相控阵声场区别于普通超声声场的两大特性, 为研究聚焦深度和偏转角度对超声相控阵检测结果的影响, 通过设置比较试验, 以不同深度的横通孔模拟缺陷, 分析了不同聚焦深度以及带楔块偏转角度对超声相控阵检测定量和定位的影响。结果表明, 当带楔块偏转角度较大时, 超声相控阵检测对于缺陷的定位会产生较大偏差; 对于聚焦深度附近范围内缺陷检测, 其定位误差较小。而由于经过了TCG校准, 不同聚焦深度和不同偏转角度下超声相控阵检测对于缺陷的定量基本保持一致, 但在非校准孔深度处检测的横通孔当量会略低于校准孔深度处检测的横通孔当量。

关键词: 超声相控阵; 聚焦深度; 偏转角度; 定量和定位; TCG校准

中图分类号: TG115.285

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2023.11.007

Effect of Aggregation Depth and Dacoustic Beam Angle on the Quantification and Localization of Ultrasonic Phased-array Detection

ZHANG Xinlei

(1.Fujian Academy of Building Research Co., Ltd., Fuzhou 350100, China;

2.Fujian key Laboratory of Green Building Technology, Fuzhou 350100, China)

Abstract: Focusing and deflection are two characteristics that distinguish the ultrasonic phased array sound field from the ordinary ultrasonic sound field. In order to investigate the impact of focusing depth setting and deflection angle on the ultrasonic phased array detection results, the influence of different focusing depths and different deflection angles with wedges on the quantitative and localization of ultrasonic phased array detection has been analyzed by setting up comparative experiments to simulate defects with different depths of cross-pass holes. The results show that when the deflection angle of the band wedge is large, the ultrasonic phased array will have a large deviation for the localization of defects. For the detection of defects in the depth range near the focusing depth, the localization error is relatively small. As a result of TCG calibration, the quantification of defects by the ultrasonic phased array at different focusing depths and different deflection angles is basically consistent, but the through-hole equivalent detected at the depth of non-calibrated holes is slightly lower than that detected at the depth of calibrated holes.

Key words: ultrasonic phased array; depth of focus; deflection angle; quantification and localization; TCG calibration

0 前 言

超声相控阵探头通常由多个阵元组成, 而每个阵元都能独立赋予不同的激励开始时间,

并且通过一定的延时法则, 使得各个阵元的声束沿一定角度在一定深度处叠加干涉, 从而实现超声相控阵声束的聚焦与偏转。因此, 声束的聚焦与偏转极大影响了相控阵的声场分布特

性，而声束聚焦和偏转等相关因素对超声相控阵检测的影响也一直是相关研究的重点^[1-3]。

WooH 等^[4-6]探究了声束的指向性与换能器参数的对应关系，并且通过有限元仿真和试验分析对相控阵的偏转和聚焦声场进行了研究分析。Dalichow 与 Dennis 等^[7]通过稀疏孔径技术，探究了基于面阵阵元下的声束聚焦与偏转，并研究了其三维成像的特性。刘志浩等^[8]基于线性阵列阵元，通过建立数值模型模拟声场，研究了合成声束的偏转和聚焦特性以及三维成像的机理与方式。祝清华等^[9]主要是通过对比试验，探究了超声相控阵扇扫成像的质量与孔径、偏转角度和聚焦设置深度等影响因素的关系。

目前针对于超声相控阵声束聚焦和偏转特性的研究，大多是采用数值模拟及对比试验的方式，分析聚焦深度和偏转角度对于声场分布的影响。然而在现场检测过程中，对于缺陷的准确定量和定位是检测结果准确性和缺陷评定的关键。本研究以此为出发点，以不同深度的 $\Phi 3\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 横通孔作为人工模拟缺陷，探究在不同聚焦深度和不同带楔块偏转角度对超声相控阵检测缺陷回波强度以及缺陷深度定位误差的影响，从而为实际现场检测过程中的聚焦深度和偏转角度等参数选择和设置提供一定的试验基础和建议。

1 相控阵检测对比试验

对比试验选用的超声相控阵仪器型号为 SIUI

SyncScan 32E，探头型号为 5.0L32-0.5-10，楔块型号为 16N5SS，相关参数见表 1~表 3。

表 1 探头相关参数

阵元数目/ mm	阵元频率/ MHz	阵元中心 间距/mm	仰角孔径/ mm
32	5	0.5	10

表 2 楔块相关参数

楔块声速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	楔块角度/($^{\circ}$)	楔块折射角/($^{\circ}$)
2 360	36	55

表 3 其他相关参数

角度范围/($^{\circ}$)	聚焦深度/mm	TCG 校准孔深度/mm
35~70	20, 40, 60	10, 30, 50, 70

本试验选用 CSK- I A 作为声速校准、楔块延迟校准、ACG 校准的试块，TCG 校准采用在超声对比试块 RB- II 上不同深度的 $\Phi 3\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 横通孔进行。该试验同样以对比试块 RB- II 上的 $\Phi 3\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 横通孔为检测对象。

2 试验结果与分析

2.1 试验检测结果

根据以上试验参数，聚焦深度设置为 20 mm、40 mm、60 mm 深度处，测量在不同聚焦深度下，不同检测深度（10~70 mm）、不同带楔块声束角度（35°~70°）处 $\Phi 3\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 横通孔的回波当量和仪器显示深度。其试验数据见表 4~表 6。

表 4 聚焦深度 20 mm 时的试验数据

角度/ ($^{\circ}$)	缺陷深度 10 mm		缺陷深度 20 mm		缺陷深度 30 mm		缺陷深度 40 mm		缺陷深度 50 mm		缺陷深度 60 mm		缺陷深度 70 mm	
	缺陷当量/dB	定位深度/mm												
35	0.47	9.62	-0.93	20.03	-0.50	30.64	-1.72	40.76	0.57	51.55	0.66	62.06	0.47	71.59
40	0.10	9.73	-0.82	20.11	-0.40	30.49	-1.96	40.41	1.44	50.69	0.84	60.98	0.29	71.08
45	0.19	9.49	-0.82	20.09	0.00	30.52	-2.34	40.69	0.84	51.03	-0.50	61.71	0.10	71.71
50	0.47	9.25	-0.40	20.11	0.19	30.51	-1.96	40.84	0.57	51.24	-0.50	62.26	0.47	72.13
55	0.00	9.90	-0.30	20.42	-0.50	31.08	-0.93	41.60	0.84	52.46	-0.82	62.71	0.19	72.41
60	0.57	9.83	-1.49	20.68	0.29	31.41	-1.49	41.96	0.92	52.45	-0.61	63.30	-0.10	72.83
65	0.57	10.33	-2.60	21.43	-0.30	31.82	-3.00	43.57	0.29	54.26	-2.61	66.07	-1.26	74.73
70	0.66	10.41	-1.72	21.90	-0.71	32.14	-1.72	46.50	0.38	57.11	-0.20	65.00	-0.20	70.35

表5 聚焦深度40 mm时的试验数据

角度/ (°)	缺陷深度 10 mm		缺陷深度 20 mm		缺陷深度 30 mm		缺陷深度 40 mm		缺陷深度 50 mm		缺陷深度 60 mm		缺陷深度 70 mm	
	缺陷当量/dB	定位深度/mm												
35	0.29	9.43	-0.50	20.03	-0.30	30.44	0.00	40.66	0.84	50.87	-0.20	61.28	2.07	71.59
40	0.10	9.55	-1.26	19.84	-0.20	30.31	-0.82	40.77	0.66	50.78	-1.26	60.98	1.27	71.08
45	0.29	9.32	-2.09	20.00	0.29	30.52	-1.49	40.69	0.29	51.03	-1.49	61.71	1.27	71.71
50	0.29	9.41	-1.60	20.34	0.19	30.82	-2.34	41.15	0.00	51.78	-1.49	61.65	0.66	72.13
55	0.19	9.49	-0.93	20.35	0.66	31.29	-1.72	41.67	-0.50	52.46	-2.47	63.26	0.00	72.44
60	0.47	9.35	-1.04	20.86	0.10	31.47	-2.34	41.72	-1.84	52.87	-1.96	64.21	-0.71	72.83
65	0.10	10.34	-2.09	21.89	0.47	32.07	-3.34	43.77	-1.37	53.32	-3.02	66.07	-0.71	75.69
70	-0.30	10.21	-2.34	22.96	0.29	32.19	-4.34	43.05	-0.93	53.67	-3.00	65.57	-1.84	73.07

表6 聚焦深度60 mm时的试验数据

角度/ (°)	缺陷深度 10 mm		缺陷深度 20 mm		缺陷深度 30 mm		缺陷深度 40 mm		缺陷深度 50 mm		缺陷深度 60 mm		缺陷深度 70 mm	
	缺陷当量/dB	定位深度/mm												
35	0.66	9.43	1.01	19.64	0.47	29.95	-0.61	40.26	0.66	50.87	-0.50	60.49	0.10	70.70
40	0.56	9.37	0.47	19.84	-0.30	29.85	-1.72	39.95	0.66	50.78	-0.93	60.24	0.29	71.08
45	0.38	9.16	-1.37	19.67	-0.20	30.52	-1.72	40.69	0.57	51.03	-1.49	61.04	0.47	71.71
50	0.29	9.02	-1.49	20.34	-0.20	30.82	-1.49	40.69	0.47	51.24	-1.80	61.65	-0.20	72.13
55	-0.20	9.28	-1.37	20.63	-1.17	31.24	-1.72	41.67	-0.50	51.98	-2.73	62.71	-0.20	72.41
60	-0.30	9.35	-2.73	20.86	-1.49	31.47	-1.60	42.44	-0.30	52.87	-2.34	63.30	-1.96	72.83
65	-0.93	9.73	-3.57	21.89	-1.72	32.68	-4.04	44.05	-0.40	54.61	-2.65	65.26	-2.34	74.32
70	-1.34	10.21	-4.50	22.96	-0.93	34.24	-4.34	45.51	-1.84	55.11	-3.87	65.60	-3.28	72.37

2.2 试验结果分析

2.2.1 聚焦深度对检测定量及定位的影响

(1) 聚焦深度对检测定量的影响

试验以 $\Phi 3$ mm \times 40 mm横通孔作为灵敏度基准,因此在理论上校准完成后使用超声相控阵再次测量 $\Phi 3$ mm \times 40 mm横通孔的当量应为 $\Phi 3$ mm \times 40 mm+0 dB。但由于耦合、校准、周边环境、人为因素等等相关因素的误差影响,在最终测量结果时会出现一定的偏差。根据GB/T 32563《无损检测 超声检测 相控阵超声检测方法》,当灵敏度偏差 ≤ 3 dB时无需重新设置。如图1所示,不同聚焦深度下不同深度的 $\Phi 3$ mm横通孔当量基本都在 $\Phi 3$ mm ± 3 dB范围内,当带楔块偏转角度过大时(65°)有个别数据超出此范围,且当量数值基本保持一致无明显差异。这是由于TCG校准时,会对相关缺陷回波幅值进行补偿,使得不同深度、不同角度、相同尺寸的缺陷当量保持一

致,因此即使聚焦深度发生变化,在经过TCG校准后,不同深度、不同角度的 $\Phi 3$ mm \times 40 mm横通孔当量测量结果均维持在 $\Phi 3$ mm \times 40 mm+0 dB附近。同时可以看到在非校准孔深度处(20 mm、40 mm、60 mm)检测的横通孔当量大多略低于校准孔深度处(10 mm、30 mm、50 mm、70 mm)检测的横通孔当量。因为在非校准孔深度位置处,TCG校准采用的是插值补偿的方法,会与实际值形成一定的偏差。

(2) 聚焦深度对检测定位的影响

据图2可知,因定位相较于缺陷定量来说更加精确,所以可以看到不同聚焦深度对于测量不同深度横通孔的定位有所差异。对于在聚焦深度位置附近的横通孔,测量定位误差相对较小。如图2(a),在测量深度为10 mm的横通孔时,聚焦深度为20 mm时定位误差比聚焦深度40 mm和60 mm时相对较小。同样在测量深度为60 mm的

横通孔时，聚焦深度为60 mm时的定位误差比聚焦深度为20 mm和40 mm时普遍较小。而相对处于中间位置的30 mm及40 mm深的横通孔时，聚

焦深度的不同在定位上并没有显现明显的差异。因此对于聚焦深度的选择，应选择在缺陷深度的附近可提高超声相控阵检测缺陷定位的精确度。

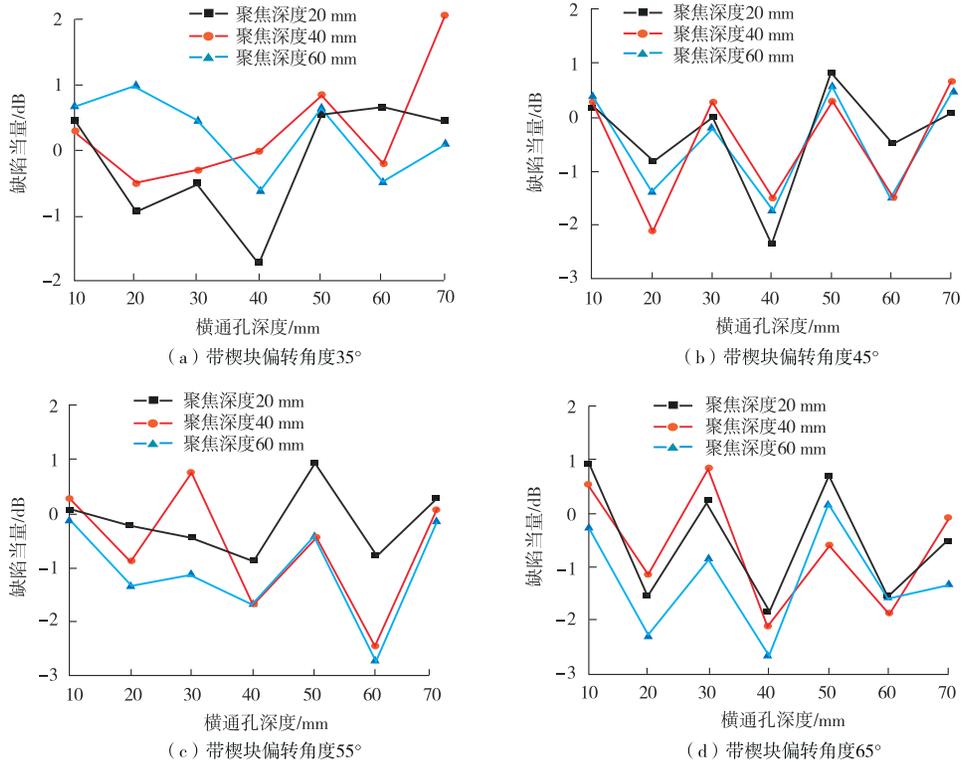


图1 不同聚焦深度下 $\phi 3$ mm横通孔当量

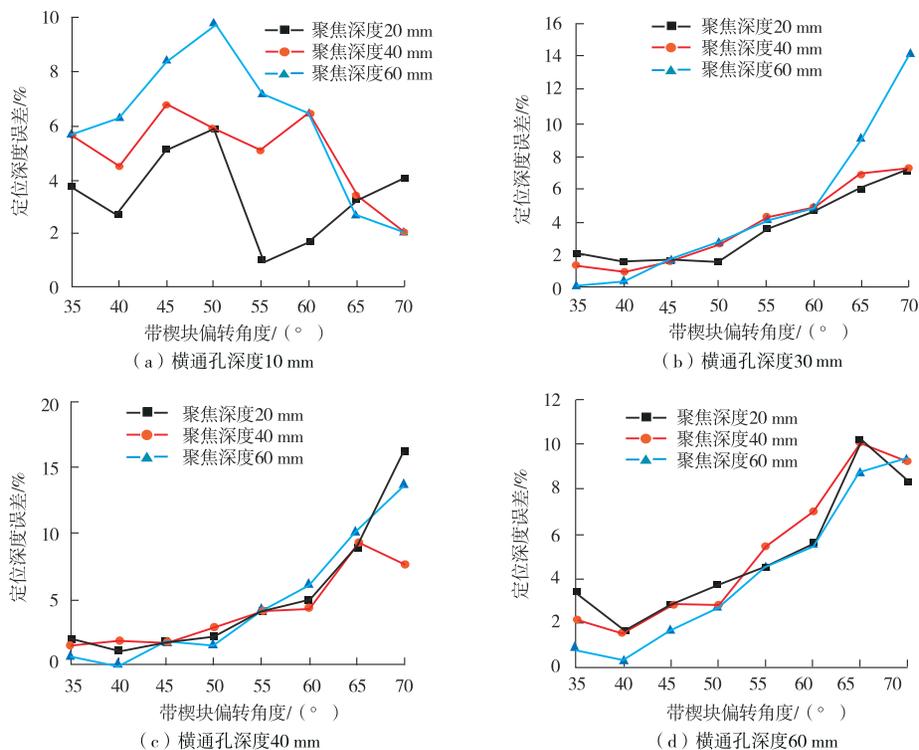


图2 不同聚焦深度下 $\phi 3$ mm横通孔定位深度误差

2.2.2 带楔块偏转角度对检测定量及定位的影响

(1) 带楔块偏转角度对检测定量的影响

如图3所示，随着带楔块偏转角度的变化，横通孔当量变化并没有显示明显的规律性，且虽不同带楔块偏转角度间的定量测量结果有所

偏差，但数据大多保持在 $\Phi 3 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \pm 3 \text{ dB}$ 范围内。这同样是由于TCG校准时的补偿设定已经排除了偏转角度对检测定量的影响，与聚焦深度对超声相控阵检测定量的影响结果保持一致。

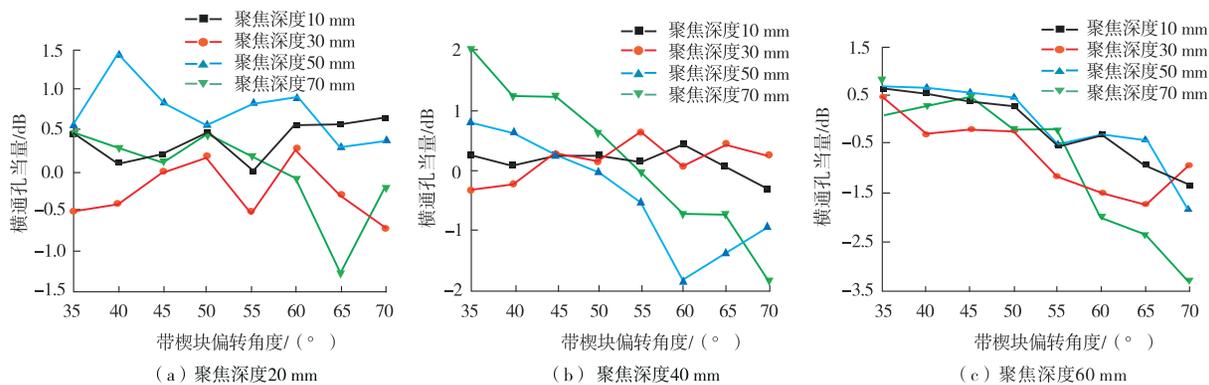


图3 不同带楔块偏转角度下 $\Phi 3 \text{ mm}$ 横通孔当量

(2) 带楔块偏转角度对检测定位的影响

如图4所示，在聚焦深度分别为20 mm、40 mm、60 mm的情况下，不同深度横通孔检测定位误差的总体趋势均随着带楔块偏转角度的增大而增大。以定位误差5%为基准，可以看到大

多数情况下，当带楔块偏转角度 $\geq 65^\circ$ 时，超声相控阵检测缺陷定位的误差 $>5\%$ ，多数都在10%附近。因此为保证超声相控阵检测缺陷定位的准确性，建议在本试验所用探头和楔块参数下，带楔块偏转角度不应超过 65° 。

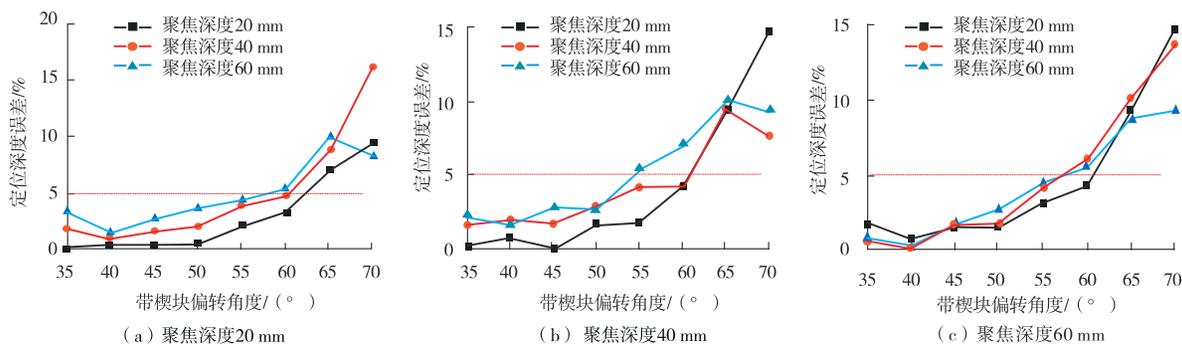


图4 不同带楔块偏转角度下 $\Phi 3 \text{ mm}$ 横通孔定位深度误差

3 结论

(1) 设置不同聚焦深度及带楔块偏转角度对超声相控阵检测定量及定位影响的对比试验，由于TCG校准过程中的补偿特性，使得不同聚焦深度及不同带楔块偏转角度下超声相控阵对于相同尺寸及类型的横通孔检测定量结果基本保持一致。

(2) 由于目前超声相控阵对于非校准孔深度处采用插值补偿会造成一定的误差，根据试验结果对于非校准孔深度处的缺陷定量会略低于校准

孔深度处的缺陷定量。

(3) 对于聚焦深度附近处的缺陷检测，通常会取得更好的定位精确性，因此对于处于不同深度的缺陷应采用接近于该缺陷深度的聚焦深度。

(4) 随着带楔块偏转角度的不断增大，缺陷定位误差有增大的趋势。因此在实际检测中需要控制带楔块偏转的最大角度，不同仪器和探头参数均会对其产生影响，建议在检测前通过试验确定。在本例中建议带楔块角度不超过 65° 。

(下转第49页)