空气耦合超声探头声场及其对检测的影响

吴君豪　何双起　罗　明　吴时红　张　颖
（航天材料及工艺研究所，北京　100076）

文　摘　搭建空气耦合超声探头声场的指向性测量系统，考察4种型号的空气耦合超声探头声场的指向性。对预制分层缺陷的复合材料试样进行检测，分析了声场对检测结果的影响。结果表明，低频率、平探头的声场能量高，指向性较差，而高频率、聚焦探头声场能量低，指向性好，检测横向分辨率高。在保证穿透能力的前提下，应尽量选择后者。根据探头声场分布情况，合理调整检测距离，使被检材料位于探头的焦区内，也能够提高检测灵敏度。

关键词　空气耦合，超声检测，声场，缺陷评定
中图分类号：TB553　　DOI：10.12044/j.issn.1007-2330.2018.02.015

Acoustic Field of Air-Coupled Ultrasonic Probe and Its Effect on Detection

WU Junhao　HE Shuangqi　LUO Ming　WU Shihong　ZHANG Ying
（Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing　100076）

Abstract　A measurement system of air coupled ultrasonic field is set up, and the field of 4 types of air coupled ultrasonic probe is detected. Composite specimens with embedded delamination are detected, effect of acoustic field on the detection results is analyzed. The results show that the low frequency and flat probe have high acoustic field energy and poor directivity, while the high frequency and focusing probe has low acoustic field energy, good directivity and high lateral resolution. The latter should be chosen as long as the penetration capability is guaranteed. Detection distance should be determined according to the acoustic field distribution. The detection sensitivity can be improved when the detected material is located in the focal region of the probe.

Key words　Air-coupled, Ultrasonic testing, Acoustic field, Defect evaluation

0　引言

空气耦合超声检测免除了传统的液体耦合介质，具有非接触、易实现自动化的优点，但缺点是超声频率低、检测灵敏度低[1]。空气耦合超声探头声场存在一个“声照区”，声场的强度、声束的宽度分别影响着穿透能力和横向分辨率。了解探头声场分布，有助于提高检测可靠性，亦可在仿真试验中利用测得的相关声场特性，提高建模准确性。V. KOMMAREDDY等对空气耦合超声声场进行测量，但缺少对声场测量结果的严格评价，也没有深入分析声场对检测效果的影响[2]。孔涛等设计了一套空气耦合超声探头的声场测量系统，但其可移植性较差[3]。本文提出的声场测量方案可以运用在任何二维空气耦合扫查系统上，快速测量探头的声场特性。基于该方案，测量了4种型号的空气耦合超声探头声场的指向性，数据结果丰富，并分析了其对缺陷检测效果的影响。

1　测量方案

1.1　空气耦合超声探头

待测的4种规格压电型空气耦合超声探头的相关参数见表1。

表1　探头参数

Tab.1　Probe parameters

探头型号	标称焦距 L/mm	激发晶片直径 d/mm
140kHz 平探头	-	25
200kHz 平探头	-	25
200kHz 聚焦探头	50	20
500kHz 聚焦探头	50	19

收稿日期：2017-06-28

第一作者简介：吴君豪，1993年出生，硕士研究生，主要从事的超声无损检测技术研究工作。E-mail：wujunhao@buaa.edu.cn

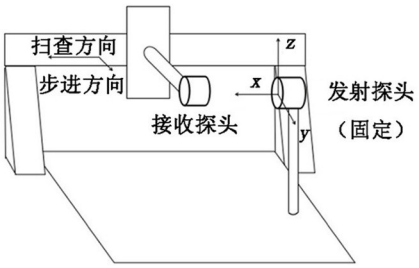
1.2 测量系统搭建

空气耦合超声探头声场的测量借鉴了水听器测量超声探头声场的方法,在接收探头前安装一个带小孔的遮声罩作为接收装置,移动得到空间每一点的声压,从而得到探头的声场指向性特性[4]。

声场测量系统在平面二维空气耦合超声检测系统上改造得到。发射探头固定在距离平台一定高度位置且水平放置。接收探头安装在扫查架上且水平放置,能够完成二维运动。将两个探头靠近,调整两者高度和准直度,保证发射探头轴线处于接收探头的运动平面内,如图 1(a)。遮声罩良好的隔声能力是准确测量声场的前提条件。用密度较大的金属铼制作遮声挡片,并利用套箍将其安装在接收探头前部,如图 1(b)。根据隔声的基本规律[5],当声波通过中间层,其隔声量为:

$$TL=10\lg\frac{1}{t_1}=10\lg\frac{4\cos^2k_2D+(R_{12}+R_{21})^2\sin^2k_2D}{4}\quad(1)$$

式中,t_1为声波穿过薄板的声强透射系数,k_2为声波在薄板中的波数,D 为薄板厚度,R_{12}、R_{21}分别是薄板与空气、空气与薄板的声阻抗之比。对比铼与普通不锈钢的隔声能力,见表 2,在空气声阻抗 409.7 N·s/m^3,挡片厚度为 1 mm 的情况下,铼板隔声量大于 87 dB,且比不锈钢高 8 dB 以上。另外,遮声挡片中心透声圆孔的直径为 0.8 mm,与被测探头中心频率对应的最短波长(约 0.7 mm)相当,较小的孔径保证了声场测量精度。



(a) 测量系统



(b) 带遮声罩的探头

图 1 空气耦合超声探头声场测量方案

Fig. 1 Acoustic field measurement scheme for air-coupled ultrasonic probe

表 2 不锈钢和铼的隔声能力对比

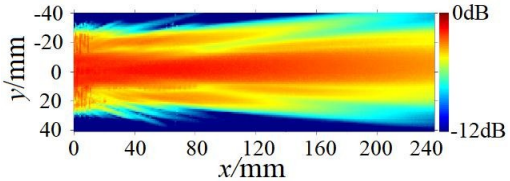
Tab. 2 Comparison of acoustic insulation ability between steel and rhenium

遮挡材料	密度 /g·cm^{-3}	纵波声速 /m·s^{-1}	隔声量/dB		
			140 kHz 超声波	200 kHz 超声波	500 kHz 超声波
不锈钢	7.93	5900	78.6	81.7	89.7
铼	21.04	4700	87.1	90.2	98.2

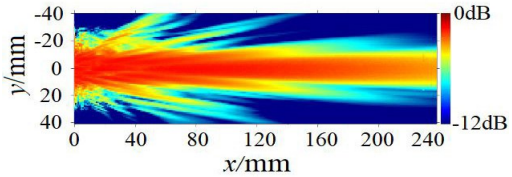
发射探头的激励脉冲周期数为 3,扫查步进间距为 1 mm,扫查速度为 100 mm/s,信号的采样频率为 5 MHz。由于系统的采样深度 800 μs 的限制,最远测量距离约为 270 mm。

2 结果及分析

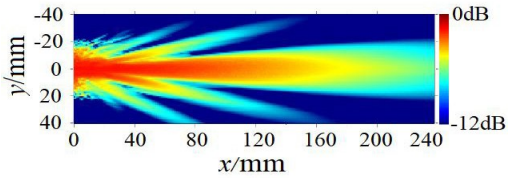
四种探头的声场强度分布情况见图 2。



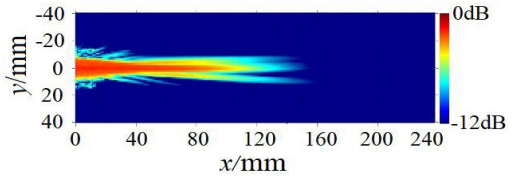
(a) 140kHz 平探头



(b) 200kHz 平探头



(c) 200 kHz 聚焦探头



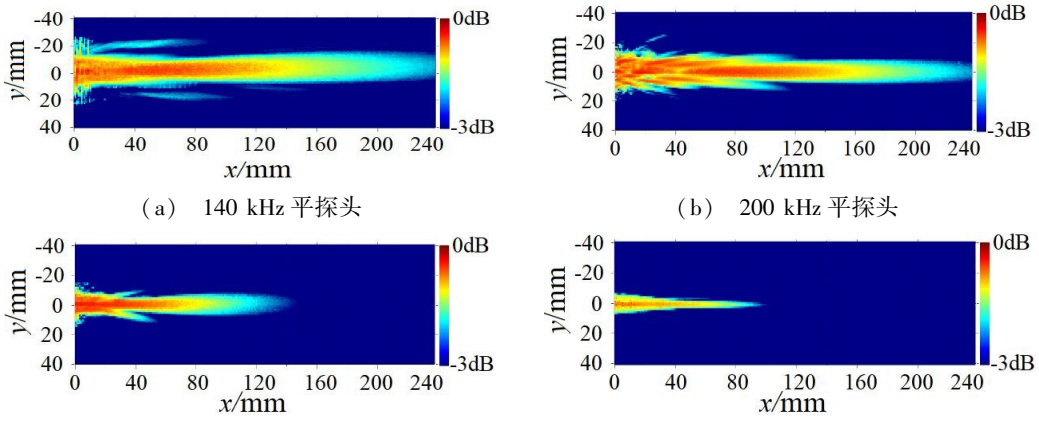
(d) 500 kHz 聚焦探头

图 2 四种探头的声场分布

Fig. 2 Acoustic fields of four probes

对比 140、200 kHz 平探头声场[图 2(a)(b)],可以发现,频率较低的探头声束更宽、更发散,与理论相符。对比 200 kHz 平探头和聚焦探头声场情况[(图 2(b)(c)],可见平探头的声场整体上声压更高,对材料的穿透能力更好。聚焦探头仍具有活塞声源的特征,200、500 kHz 聚焦探头声束存在旁瓣[图 2(c)(d)]。

为了观察声场中能量高的中心部位的情况,只将声压在-3 ~0 dB 的部分显示出来,得到的声场分布如图 3 所示,从该图可以看到声场核心区域的声压分布细节特征。



(a) 140 kHz 平探头　(b) 200 kHz 平探头

(c) 200 kHz 聚焦探头　(d) 500 kHz 聚焦探头

图 3　四种探头核心部分的声场分布

Fig. 3　Acoustic field in the center region of the four probes

图 3 表明,平探头近场区声压存在极大极小值点,与理论相符,特别是 200 kHz 平探头的近场区干涉效应较明显[图 3(b)]。因聚焦探头压电材料是球面状的,所以因声程差异造成的干涉效果较小,在近场区未发现明显干涉效应。500 kHz 比 200 kHz 聚焦探头的声场聚焦效果好,声束宽度更窄,表明其横向分辨率优于后者[图 3(c)(d)]。

通过数据处理,得到四种探头轴线上的声压分布(图 4),平探头声压在近场存在波动现象,根据定义,曲线上最后一个峰值所在位置为探头的近场区长度。

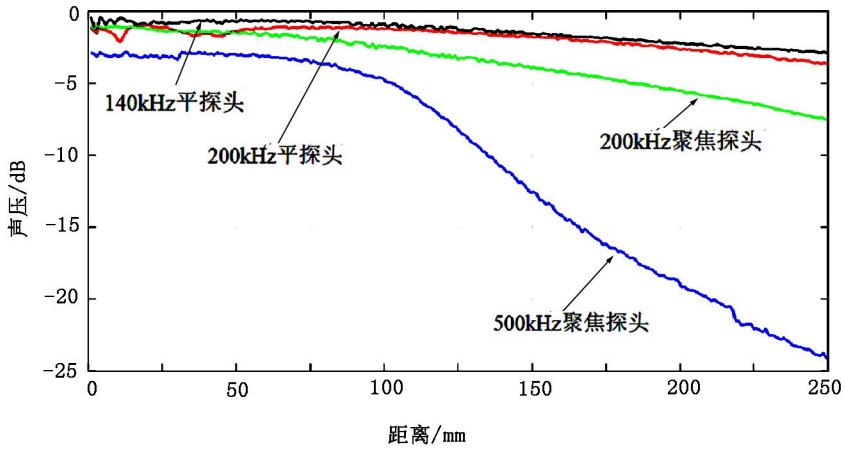


图 4　四种探头轴线上的声压

Fig. 4　Acoustic pressure on the axes of the four probes

图 4 表明,远场区的声衰减与探头频率有关,频率越高声压衰减更快。500 kHz 探头远场轴线声压曲线上能看到球面波的衰减特性,即声压与距离成反比。图 4 中四种探头轴线上的近场声压的波动反映了干涉效应,140、200 kHz 平探头近场区的声压波动明显,而 200、500 kHz 聚焦探头近场区的声压则较平稳,与图 3 的分析结果一致。

依据美国材料学会标准 ASTM E1065[6] 对探头的指向性参数进行评价,平探头的评价参数包括近场区长度、声轴声压特性、声束半扩散角,聚焦探头的评价参数包括焦区范围、声束聚焦角。表 3 中,平探头的半扩散角、近场区长度的理论值是根据圆盘活塞声源发射声场指向性理论公式[7] 计算得到的,聚焦探头焦距的理论值指的是探头的标称焦距。平探头的

半扩散角、近场区长度比理论值小,特别是半扩散角测量结果差异较大,说明指向性理论仅可用于探头声场特性的粗略估计,仍需要测量才能得到较准确的结果。聚焦探头声场存在一个焦区,在该范围内声压差异不大,标称焦距在该焦区范围内,说明标称值是可靠的,在检测中可以作为参考。

表 3　空气耦合超声探头声场测量结果

Tab. 3　Acoustic field measurement results of air coupled ultrasonic probes

探头型号	焦距/mm		聚焦声束夹角/(°)		半扩散角/(°)		近场区长度/mm	
	理论值	实测值	理论值	实测值	理论值	实测值	理论值	实测值
140kHz 平探头	–	–	–	–	6.4	5.7	62.6	约 50.0
200kHz 平探头	–	–	–	–	4.4	2.7	90.0	约 70.0
200kHz 聚焦探头	50.0	20.0 ~ 60.0	–	2.6	–	–	–	–
500kHz 聚焦探头	50.0	25.0 ~ 65.0	–	4.8	–	–	–	–

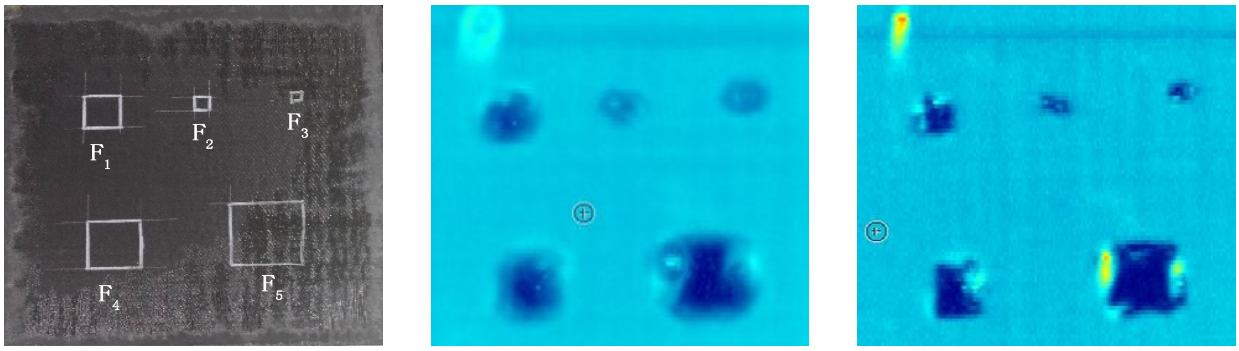
3　检测结果与声场的关系

超声穿透法通过监测穿透波信号幅度的变化实现对复合材料内部分层缺陷的检测,其检测能力受到声场特性(特别是声束宽度)的影响[8]。

用真空热压罐法制作带有分层缺陷的碳纤维增强树脂基复合材料试样。单层预浸料厚度为 0.15 mm,总共铺层 20 层,中间 6 层预浸料上切除 5 个的正方形区域(边长分别为 5、10、20、30、40 mm),用以模拟分层缺陷。固化成型之后得到带有分层的试样,如图 5(a)。结合声场特性,对该试样的穿透式空气耦合超声检测效果进行定性分析。

对比同频率(200 kHz)聚焦探头和平探头的检测结果(图 5),平探头因为声束发散,缺陷边缘模糊,易产生定量误差。

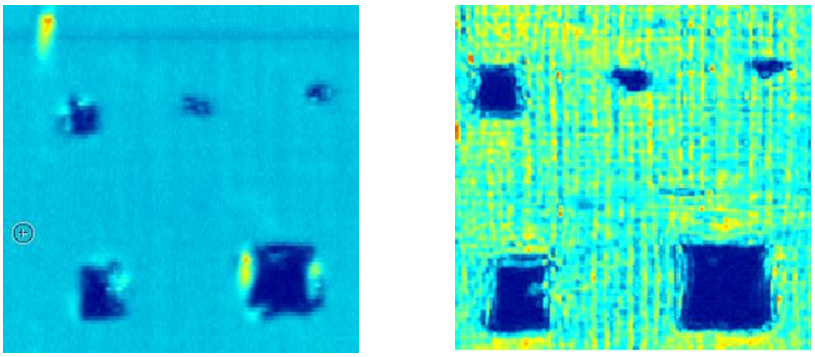
对比试样在 200、500 kHz 聚焦探头下的检测结果(图 6),后者能检测到材料内部纹理特征,因为后者无论是横向分辨率(与声束聚焦效果有关),还是纵向分辨率(与声波频率有关)都优于前者。所以,在保证穿透能力的前提下,应优先使用高频聚焦探头。



(a)　试样　　(b)　平探头　　(c)　聚焦探头

图 5　试样及 200 kHz 平探头和聚焦探头的检测结果

Fig. 5　Specimen and detection results of the 200 kHz focusing and flat probe

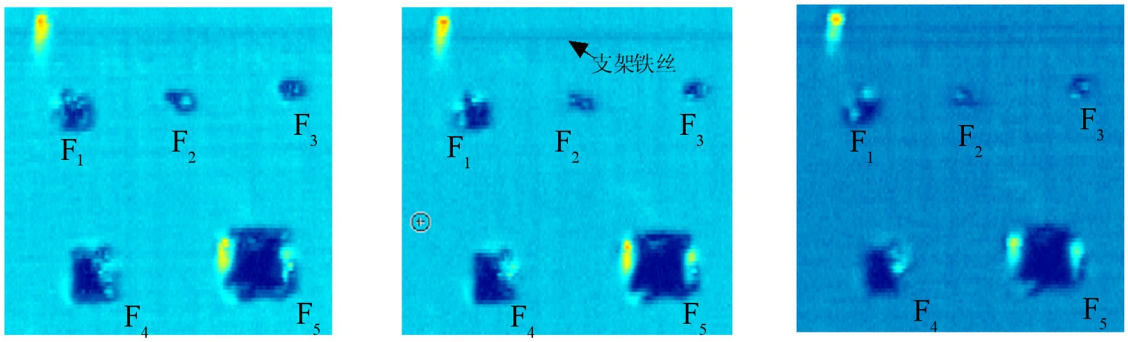


(a)　200 kHz 聚焦　　(b)　500 kHz 聚焦

图 6　声束聚焦效果及声波频率对检测结果的影响

Fig. 6　Effect of beam focusing and ultrasonic freqency on detection results

最后考察检测距离的影响。图 7 为试样放置在距离 200 kHz 聚焦发射探头 10、30、70 mm 下的检测结果。30 mm 下的检测效果最好,支架铁丝[直径约 1 mm,图(b)上方的线条]依然清晰可见。70 mm 下接收能量降低,图像信噪比低,小缺陷(F1、F2、F3)不明显,大缺陷(F4、F5)的边缘模糊。所以,材料应该放置在焦区内进行检测。



(a) 10mm　　(b) 30mm　　(c) 70mm

图 7　检测距离对结果的影响

Fig. 7　Effect of detection distance on the result

4　结论

本文设计的声场测量系统可以便捷、有效地测量空气耦合超声探头声场,分析声场测量结果及其对检测的影响有以下结论。

(1)空气耦合超声探头的声场特性与圆盘活塞声源具有相似之处,如旁瓣、近场区的干涉效应、轴线声压特性。可根据 ASTM E1065 标准评价探头的声场特性参数。根据圆盘活塞声源理论推导得到的平探头的近场区长度和半扩散角,与实测值相比偏大。聚焦探头的标称焦距在实测焦区范围内,实际检测中,可以为确定检测距离提供依据。

(2)不同型号空气耦合超声探头的声场特性存在较大差异。低频率、平探头的声场能量高,穿透效果好,指向性较差,而高频率、聚焦探头声场能量低,指向性好,检测横向分辨率高。在保证穿透能力的前提下,应尽量选择后者。

(3)根据探头声场分布情况,调整检测距离,使被检材料位于探头的焦区内,能够提高检测灵敏度。

参考文献

[1] 周正干, 魏东. 空气耦合式超声波无损检测技术的发展[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6):10-14.

[2] KOMMAREDDY V, PETERS J J, DAYAL V, et al. Air-coupled ultrasonic measurements in composites[C]// American Institute of Physics, 2004:859-866.

[3] 孔涛, 徐春广, 张运涛,等. 空气耦合超声换能器声场计算与测量研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(22):19-24.

[4] BASHFORD A G, HUTCHINS D A, SCHINDEL D W. Radiated fields of an air-coupled ultrasonic capacitance transducer[J]. Ultrasonics, 1996, 34(2-5): 169-172.

[5] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础. 第 3 版[M]. 南京:南京大学出版社, 2012: 144-145

[6] ASTM E1065 / E1065M-14, Standard guide for evaluating characteristics of ultrasonic search units[S]. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014

[7] 郑晖, 林树青. 超声检测. 第 2 版[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社, 2008: 56-62

[8] 赵建华, 罗明, 吴时红, 等. 超声波喷水穿透法在先进复合材料检测中的应用[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(4): 105-108.