

DOI: 10.11973/wsjc201811011

# 复合材料孔隙率的超声检测衰减系数影响因素

王 锋<sup>1,2</sup>, 何方成<sup>1,3</sup>

(1.中国航发北京航空材料研究院,北京 100095;2.航空材料检测与评价北京市重点实验室,北京 100095;

3.中国航空发动机集团材料检测与评价重点实验室,北京 100095)

**摘要:**针对复合材料孔隙率检测需求,研究超声检测参数和被检测材料本身对超声检测衰减系数的影响,间接推断出衰减幅度的影响因素。开展了检测频率、探头类型、检测水距、材料种类对复合材料声波衰减系数的影响试验。结果表明,检测频率越高衰减系数越大,探头声束宽度越大衰减系数越大,不同材料体系的声衰减系数不同。

**关键词:**复合材料;孔隙率;衰减系数;影响因素;超声检测

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2018)11-0042-03

## Influencing Factors of the Attenuation Coefficient of the Ultrasonic Testing for Composite Porosity

WANG Zheng<sup>1,2</sup>, HE Fangcheng<sup>1,3</sup>

(1.AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095 ,China;

2. Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing 100095, China;

3.Key Laboratory of Science and Technology on Aeronautical Materials Testing and Evaluation,  
Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China)

**Abstract:** The influencing factors of the attenuation coefficient for porosity testing of composite are studied in this article. The experiments of changing the test frequency, probe type, water distance and the material to measure the influence to the attenuation coefficients are done. The results show that the higher the detection frequency, the bigger the attenuation coefficient, the bigger the probe beam width, the bigger the attenuation coefficient, and the acoustic attenuation coefficient of different material systems is different.

**Key words:**composite; porosity; attenuation coefficient; influencing factor; ultrasonic testing

复合材料制件在制造过程中会不可避免地产生孔隙<sup>[1]</sup>,制件在受力后,孔隙会进一步扩展成损伤缺陷,从而降低材料性能,孔隙的存在还可能增加水的渗入几率或受其他环境的影响<sup>[2-3]</sup>。孔隙含量的不同对材料性能的影响程度也不同<sup>[4-6]</sup>。因此,开展孔隙缺陷的定量无损评价技术研究十分重要。无损评价结果可以用来预测带有孔隙的复合材料制件在使用过程中可能产生损伤的严重程度,从而评估制件的使用寿命。

复合材料层合板中孔隙缺陷的评价方法较多,

有超声检测方法<sup>[7-9]</sup>、X 射线计算机层析检测方法、红外热像检测方法、激光超声检测方法等,其中超声检测方法中的幅度衰减法由于具有灵敏度高、可操作性强、实时性好等特点,在工程化检测中得到了广泛的应用。该方法利用的是孔隙与基体材料声阻抗的不同,声波在含有孔隙的材料中传播时,会引起声波能量的衰减,以及材料衰减系数的变化<sup>[10-11]</sup>。

衰减幅度测量的准确性关系到孔隙率评价结果的可靠程度<sup>[12]</sup>,笔者以衰减系数的测量为例,研究了检测参数和材料本身对衰减系数的影响,由对衰减系数的影响因素分析,间接推断出衰减幅度的影响因素。

## 1 玻璃板反射法检测原理

以玻璃板反射法检测复合材料的衰减系数,采

收稿日期:2018-06-29

作者简介:王 锋(1978—),女,硕士,高级工程师,主要从事金属与非金属材料无损检测技术研究工作

通信作者:王 锋,wangzhengln@sina.com.cn

用该方法检测时声传播原理示意如图 1 所示。被测试样为碳纤维层合板,通过比较声波未经过复合材料层合板与经过复合材料层合板后声压幅值的变化,来计算碳纤维层合板的声衰减系数。

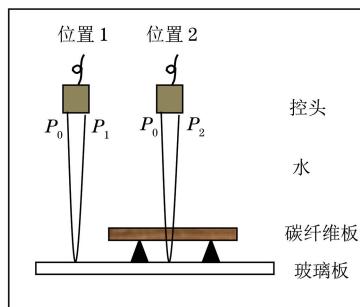


图 1 玻璃板反射法检测的声传播原理示意

当探头位于位置 1 时,发射的声波经玻璃板反射后直接被探头接收,设发射的声波强度为  $P_0$ ,则接收到的声波强度用  $P_1$  表示,则  $P_1$  如式(1)所示。

$$P_1 = P_0 R_{WB} \quad (1)$$

式中: $R_{WB}$  为水与玻璃板界面的声压反射系数。

当探头位于位置 2 时,发射声波经过碳纤维层合板透射、玻璃板反射、碳纤维层合板二次透射后,被探头接收,接收到的声波强度用  $P_2$  表示,则  $P_2$  如式(2)所示。

$$P_2 = P_0 e^{-2at} T_{WT} T_{TW} R_{WB} T_{WT} T_{TW} \quad (2)$$

式中: $T_{WT}$  为水与碳纤维层合板界面的声压透射系数; $T_{TW}$  为碳纤维层合板与水界面的声压透射系数; $\alpha$  为声波在碳纤维层合板中的衰减系数; $t$  为碳纤维层合板的厚度。

复合材料层合板通常很薄,只有几个毫米左右,因此这里忽略了有无试样情况下水与复合材料试样衰减系数不同而存在的差异,以及声波扩散衰减的影响。

根据式(1),(2)可以推算出材料中的衰减系数,其表达式如式(3)所示。

$$\alpha = -\frac{10}{t} \lg \left( \frac{1}{T_{WT}^2 T_{TW}^2} \frac{P_2}{P_1} \right) = \frac{10}{t} \lg \frac{P_1}{P_2} + \frac{10}{t} \lg (T_{WT}^2 T_{TW}^2) \quad (3)$$

$$20 \lg \frac{P_1}{P_2} = \Delta \text{dB} \quad (4)$$

$$T_{WT} = \frac{2Z_T}{Z_w + Z_T} \quad (5)$$

$$T_{TW} = \frac{2Z_w}{Z_w + Z_T} \quad (6)$$

式中: $\Delta \text{dB}$  为有无孔隙试样时探头接收的回波声压

的差值; $Z_T, Z_w$  分别为声波在碳纤维层合板和水中的声阻抗。

将式(4),(5),(6)代入式(3),则有

$$\alpha = \frac{\Delta \text{dB}}{2t} + \frac{10}{t} \lg \frac{16Z_T^2 Z_w^2}{(Z_T + Z_w)^4} \quad (7)$$

## 2 试验过程

在衰减系数检测系统中,可变的因素有检测频率、探头类型、检测水距和材料种类等。利用上述方法对这 4 种因素发生变化时衰减系数测量结果的变化情况进行讨论。

在保持其他检测条件不变的情况下,分别改变检测频率、探头类型、检测水距和材料种类等,测量水中的声阻抗  $Z_w$ 、不同孔隙含量碳纤维层合板的声阻抗  $Z_T$ ,以及检测系统中放置不同孔隙率试样与不放置孔隙率试样时探头接收到回波的声压幅度差值  $\Delta \text{dB}$  并代入式(7)中,计算出不同孔隙率碳纤维复合材料层合板中的衰减系数  $\alpha$ 。

## 3 试验结果及讨论

### 3.1 检测频率的影响

选择 5 MHz 聚焦探头和 10 MHz 聚焦探头分别测量不同孔隙含量的 CCF300/5228A 碳纤维层合板的衰减系数,并采用二次拟合曲线进行拟合,得到的不同频率聚焦探头的孔隙率与衰减系数的对应关系如图 2 所示。

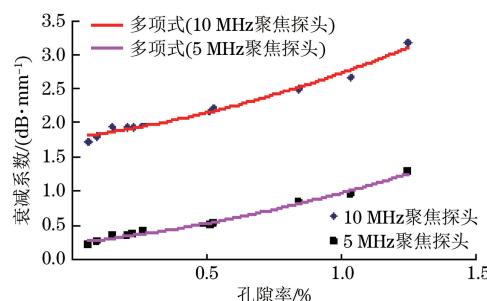


图 2 5 MHz 与 10 MHz 聚焦探头检测衰减系数与孔隙率的对应关系曲线

由图 2 可见,不同频率探头测量得到的衰减系数不同,5 MHz 聚焦探头的衰减系数小于 10 MHz 聚焦探头的。当孔隙率较大或层合板较厚时,可能会出现高频探头检测时,较大范围的孔隙率由于衰减较大而无法分辨,因此需采用较低频率进行检测。

### 3.2 探头类型的影响

选择 5 MHz 聚焦探头和 5 MHz 平探头分别测量不同孔隙含量的 CCF300/5228A 碳纤维层合板

的衰减系数,并采用二次拟合曲线进行拟合,得到的不同类型探头的孔隙率与衰减系数的对应关系如图3所示。

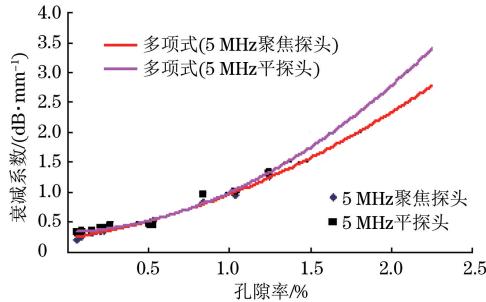


图3 5 MHz 聚焦探头与 5 MHz 平探头检测衰减系数与孔隙率的关系曲线

由图3可以看出,当孔隙率小于1%时,同频率的聚焦探头和平探头的衰减系数相差不多,当孔隙率不断增大时,同频率平探头的衰减系数将大于聚焦探头的衰减系数,且差异越来越大。这可能与两种探头的有效声束宽度有关,平探头的有效声束宽度较聚焦探头的大,有效声束覆盖面积内可能包络的孔隙较多,因而受孔隙的影响更为明显。

### 3.3 检测水距的影响

采用5 MHz 聚焦探头,焦距为150 mm,在碳纤维层合板位于探头6 dB 聚焦区内的前提下,调节水距,分别选择水距为150,144,138 mm,测量不同孔隙率试样的衰减系数,并采用二次拟合曲线进行拟合。不同水距下测量的衰减系数与孔隙率的对应关系曲线如图4所示。

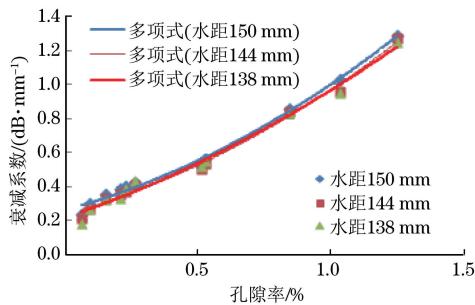


图4 5 MHz 聚焦探头在不同水距下测量的衰减系数与孔隙率的关系曲线

由图4可以看出,在探头的有效声场(聚焦探头为6 dB声场)范围内,不同水距下测量的衰减系数相差不大。这是由于虽然水距改变了,但孔隙率层合板均处于聚焦探头的6 dB声场范围内,声束宽度变化不大。

### 3.4 被检测材料的影响

采用5 MHz 聚焦探头,选择型号为CCF300/

5228A、T700/LT-03A 和 T700/5429 的3种材料的不同孔隙率试样,在相同的检测参数下分别测量衰减系数,并采用二次拟合曲线进行拟合,得到的不同材料体系的孔隙率与衰减系数的关系曲线如图5所示。

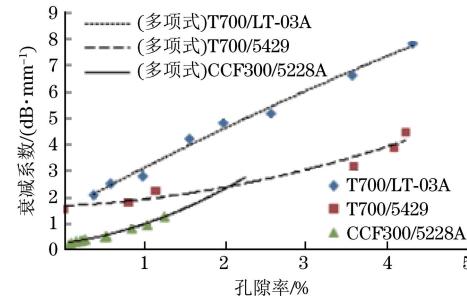


图5 不同材料体系的孔隙率与衰减系数的关系曲线

由图5可以看出,对不同的材料体系,采用相同方法、相同检测参数测量得到的不同孔隙率层合板对应的衰减系数不同。因此,对不同材料进行检测时,需要采用与其声衰减特性相同或相似的对比试块测量衰减系数或衰减幅度。

## 4 结论

(1) 检测频率越高,不同孔隙率复合材料层合板的衰减系数越大,检测时可以通过合理选择检测频率,使要求检测的孔隙率范围既能清晰分辨又有足够的梯度显示。

(2) 探头类型对衰减系数有一定影响,由试验结果看出,当孔隙率小于1%时,同频率的聚焦探头和平探头的衰减系数相差不多,当孔隙率不断增大时,同频率的平探头衰减系数将大于聚焦探头的衰减系数,且差异越来越大。

(3) 当水距变化使探头在被检测材料中的声场分布变化不大时(如聚焦探头在6 dB声场范围内),不同水距下测量的衰减系数相差不大。

(4) 碳纤维复合材料层合板衰减系数受自身材料体系的影响,不同材料体系的层合板不同孔隙率对应的衰减系数也不同,因此检测时必需使用与被检测材料声衰减特性相同或相近的对比试块。

## 参考文献:

- [1] ADAMS R D, CAWLEY P. A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints [J]. NDT and E International, 1988, 21: 208-222.

(下转第69页)

- 1816-1821.
- [36] 王强. Lamb 波时间反转方法及其在结构健康监测中的应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.
- [37] 邱雷,袁慎芳. Shannon 复数小波的复合材料结构时间反转聚焦多损伤成像方法[J]. 复合材料学报, 2010, 27(2): 101-107.
- [38] 郑嘉楠. 基于时间反转的 Lamb 波无基准结构健康监测方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.
- [39] 蔡建,石立华,袁慎芳. 基于虚拟时间反转的高分辨率复合材料板结构损伤成像[J]. 复合材料学报, 2012, 29(1): 183-189.
- [40] 屈文忠,肖黎. Lamb 波时间反转分解损伤识别方法研究[J]. 机械强度, 2014, 36(1) : 7-10.
- [41] 张望,吴维亮,肖黎,等. 闭合型裂纹时间反转损伤识别[J]. 振动与冲击, 2015, 34(9): 95-101.
- [42] 何存富,周文桢,刘增华,等. 基于多通道时间反转 Lamb 波的铝板小缺陷检测[J]. 实验力学, 2015, 30 (6):683-689.
- [43] 刘增华,徐庆龙,龚裕,等. 基于时间反转法的 Lamb 波检测技术的研究进[J]. 实验力学, 2015, 30(2): 131-141.
- [44] LIU Zenghua, YU Hongtao, FAN Junwei, et al. Baseline-free delamination inspection in composite plates by synthesizing non-contact air-coupled Lamb wave scan method and virtual time reversal algorithm [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24 (4): 045014.
- [45] 周进节. 基于时间反转方法的超声导波检测设备研制及其应用研究[D]. 北京:北京工业大学, 2012.
- [46] 邓菲. 基于 LabVIEW 的超声导波时间反转信号激励系统[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版), 2011, 11(3): 248-252.
- [47] 夏云龙,付永庆. 时间反转算子特征值分解算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(12): 1340-1343.
- [48] 雷亚辉. 水下目标的时间反转法声探测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2010.
- [49] 蒋慧琳. 基于时间反转法的铝合金板材无损检测系统软件实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2011.
- [50] 陈妍. 材料缺陷的超声波时间反转定位方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2009.
- [51] 滕飞. 基于时间反转法的兰姆波在铝合金板材缺陷检测中的应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2009.
- [52] 赵乃志. 利用压电超声导波时间反转法的管道结构裂纹监测研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- [53] 钟凯慧. 基于时间反转聚焦理论的管道超声导波检测技术研究[D]. 广州:暨南大学, 2012.
- [54] 严夏军. Lamb 波时间反转无基准损伤监测技术[D]. 南京:南京邮电大学, 2013.

(上接第 44 页)

- [2] ACHENBACH J D. Quantitative nondestructive evaluation [J]. International Journal of Solids and Structures, 2000,37:13-27.
- [3] STONE D E W, CLARKE B. Ultrasonic attenuation as a measure of void content in carbon-fibre reinforced plastics[J]. Nondestructive Testing, 1975, 8: 137-145.
- [4] MATIN B G. Ultrasonic wave propagation in fiber-reinforced solids containing voids [J]. Journal of Applied Physics, 1977,48:3368-3373.
- [5] REYNOLDS W N, WILKINSON S J. The analysis of fibre-reinforced porous composite materials by the measurement of ultrasonic wave velocities [J]. Ultrasonics, 1978,16:159-163.
- [6] HALE J M, ASHTON J N. Ultrasonic attenuation in voided fibre reinforced plastics [ J ]. NDT International, 1988,21:321-326.
- [7] DANIEL I M, WOOG S C, KOMSKY I. Quantitative porosity characterization of composite materials by means of ultrasonic attenuation measurements [ J ]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1985,5:57-68.
- [8] JEONG H, HSU D K. Experimental analysis of porosity-induced ultrasonic attenuation and velocity change in carbon composites[J]. Ultrasonics, 1995, 33:195-203.
- [9] LIN L, CHEN J, ZHANG X, et al. A novel 2-D random void model and its application in ultrasonically determined void content for composite materials[J]. NDT and E International , 2011, 44: 254-260.
- [10] TITTMANN B R, AHLBERG L A, FERTIG K W. Ultrasonic microstructural noise parameters in a powder metal alloy [ J ]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1984, 3A: 57-63.
- [11] KOGAN V G, HSU D K, ROSE J H. Characterization of flaws using the zeroes of the real and imaginary parts of the ultrasonic scattering amplitude[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1985,5:57-68.
- [12] 何方成,史亦伟.树脂基复合材料孔隙率超声表征技术研究[J].航空材料学报,2006,26(3):355-356.