

# 碳纤维复合材料孔隙率超声声阻抗法检测

林 莉<sup>\*1</sup>, 罗 明<sup>1</sup>, 郭广平<sup>2</sup>, 李喜孟<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 无损检测研究所, 大连 116024; 2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘 要:** 基于复合材料孔隙率与材料密度、超声波纵波声速之间的内在联系, 采用超声水浸底波反射回波法, 利用 5 MHz 平探头测量碳纤维单向增强复合材料超声声阻抗。借助金相显微镜测试复合材料孔隙率, 并利用实验进行参数标定后, 建立了超声声阻抗与碳纤维增强环氧树脂复合材料孔隙率  $P$  的经验公式。对  $0.03\% \leq P \leq 2.21\%$  同批复合材料试样进行实验验证, 发现声阻抗法测量结果与金相法测量结果相符。利用该方法测量孔隙率, 无须测量材料声速和密度, 且测量结果受孔隙形貌影响较小, 易于实现, 在复合材料孔隙率无损检测方面具有可行性。

**关键词:** 复合材料; 孔隙率; 超声无损检测; 声阻抗

**中图分类号:** TB302 **文献标志码:** A

## Ultrasonic determination of carbon fiber composite porosity using acoustic impedance

LIN Li<sup>\*1</sup>, LUO Ming<sup>1</sup>, GUO Guangping<sup>2</sup>, LI Ximeng<sup>1</sup>

(1. Nondestructive Testing & Evaluation Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** Based on the theoretical analysis for the porosity, density and longitudinal velocity, the acoustic impedance for the carbon fiber unidirectional reinforced composite was measured using the ultrasonic immersion technique with the bottom echo reflection and a 5 MHz flat probe. The metallographic microscope was used to determine the actual porosity. An empirical equation was built for testing porosity with acoustic impedance based on the parameters calibration. The experiments for samples with porosity from 0.03% to 2.21% show that the porosity obtained from the acoustic impedance model basically accords with that from the metallographic method. According to this method, the composite porosity could be determined conveniently without measuring the material velocity and density. Influenced little by the morphology of the pores, the determination of the acoustic impedance has feasibility on nondestructive testing for composite porosity.

**Keywords:** composite; porosity; ultrasonic nondestructive testing; acoustic impedance

目前超声法检测复合材料孔隙率主要包括衰减法<sup>[1-8]</sup>、声速法<sup>[9-10]</sup>和背散射法<sup>[11-15]</sup>。衰减法由于实现简单而且受纤维含量影响较小, 受到较多关注。但由于孔隙衰减受到孔隙尺寸、形状以及分布等多种因素影响<sup>[16]</sup>, 而且建模过程中给出的诸多假设条件与实际情况之间相差较远<sup>[2]</sup>, 因此理论分析与实验结果之间难以得到一致性较好的结果<sup>[2-3, 10]</sup>。对于声速法, 由于孔隙率变化所引起的渡越传播时间的变化很小, 不仅对所采用的检测系统分辨率有很高的要求, 而且这个微小变化量还极易受到测试条件、环境和其他一些因素的影响<sup>[1]</sup>, 难

以得到可靠的结果。超声背散射法通过比较不同孔隙率下声束在检测面上的投影线与纤维呈不同夹角时背散射信号最大与最小幅度的比值来实现孔隙率检测; 具有操作简单、结果直观的特点, 对球形孔隙检测精度较高, 但在检测尺寸较大的柱状孔时可信度下降<sup>[13]</sup>。建立普遍认同的孔隙率超声检测技术, 是目前仍然十分活跃的研究课题之一。

本研究的测试对象是碳纤维增强环氧树脂基复合材料。根据 Martin 的研究工作<sup>[9]</sup>, 借鉴其给出的复合材料密度的表达式以及 Reynolds 和 Wilkinson<sup>[10]</sup>得到的纵波声速与孔隙率实验结果, 推导了

复合材料声阻抗与孔隙率之间的理论公式。利用超声底波回波反射法测量了复合材料的声阻抗,同时用金相法对孔隙率进行了实验测试,通过实验标定,确定了本研究中声阻抗法检测孔隙率模型的数学公式。实验验证表明,利用该方法对孔隙率的预测结果与金相测试结果符合很好。

### 1 检测原理

当声波垂直入射到平面界面上时,对声压分布起主要作用的是界面两侧材料的声阻抗,所以声阻抗也是超声无损表征材料性质的重要参量之一。声阻抗在数值上等于试样密度与声速的乘积,而孔隙的出现会改变试样的密度和声速,进而改变材料的声阻抗,因此孔隙率与声阻抗存在着对应关系。另外,声阻抗可以综合反映介质密度和声速的变化,相对于声速,声阻抗与材料结构特点之间的相关性较大。因此,考察试样声阻抗与孔隙率之间的关系比单独考察声速更合理。

Martin 在研究纤维增强复合材料的弹性性能时,假设含孔隙的树脂基体为各向同性材料,且孔隙只存在于树脂基体中<sup>[9]</sup>,则含孔隙试样的密度  $\rho$  为

$$\rho = \rho_f k_f + \rho_0(1 - k_f - P) \quad (1)$$

式中:  $\rho_f$  为纤维密度;  $\rho_0$  为无孔隙时树脂密度;  $k_f$  为纤维体积含量;  $P$  为孔隙率。

对于某一批成品,  $\rho_f k_f + \rho_0(1 - k_f)$  可看成常数  $m$ , 则

$$\rho = m - \rho_0 P \quad (2)$$

由 Reynolds 和 Wilkinson<sup>[10]</sup> 的理论结果纵波声速  $V$  与孔隙率  $P$  有如下关系:

$$V = V_0 - kP \quad (3)$$

式中:  $V_0$  为无孔隙时介质声速;  $k$  为与纤维体积含量有关的常数。因此有

$$\begin{aligned} Z &= (m - \rho_0 P)(V_0 - kP) \\ &= k\rho_0 P^2 - (km + V_0\rho_0)P + mV_0 \\ &= c_0 P^2 - c_1 P + c_2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  为与纤维体积含量、纤维和树脂密度等有关的常数。其中:

$$c_0 = k\rho_0, c_1 = km + V_0\rho_0, c_2 = mV_0 \quad (5)$$

对于同一批成型的复合材料,先选出一系列有代表性的材料,将超声波测试得到的声阻抗与破坏法得到的孔隙率代入式(4),利用最小二乘法标定出系数  $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ ,这样得到的检测关系就可以用来

对同一批成型的复合材料进行孔隙率超声检测。

## 2 实验

### 2.1 样品

本实验样品为 16 层预浸料热压成型的碳纤维单向增强环氧树脂基复合板,碳纤维型号为 T700,采用手糊成型工艺制备而成。复合板厚度  $2 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$ ,面积大于  $200 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ ,纤维的体积含量为  $69\% \pm 3\%$ 。超声波垂直入射到复合材料层板表面检测,声波入射方向与单向碳纤维的方向呈垂直关系。首先按照超声回波信号幅值对检测区域进行初步筛选,确定回波幅度存在差异的一系列区域,然后利用超声 C 扫描选择孔隙率分布较为均匀的 17 个微区进行孔隙率实验研究。

### 2.2 超声声阻抗测量

采用超声回波底波反射法测量声阻抗(图 1)。假设发射的超声波的起始声压为  $p_0$ ,其余各处声压如图 1 所示。探头至试样上表面距离为  $d_1$ ,复合材料板厚度为  $d_2$ ,试样下表面距离玻璃板上表面的距离为  $d_3$ ;水的衰减系数为  $T_1$ ,试样的衰减系数为  $R_1$ ;水与试样上表面之间的透射系数和反射系数分别为  $T_1$  和  $R_1$ ,与下表面之间的透射系数为  $T_2$ ,水与玻璃板之间的反射系数为  $R_2$ 。

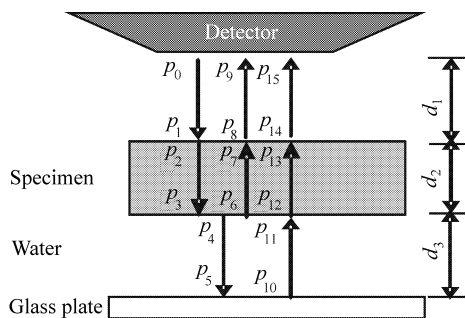


图 1 超声底板反射回波法示意图

Fig. 1 Diagram of ultrasonic board reflection method

由反射系数定义可得

$$R_1 = \frac{Z_c - Z_w}{Z_c + Z_w}, R_2 = \frac{Z_g - Z_w}{Z_g + Z_w} \quad (6)$$

式中,  $Z_c$ 、 $Z_w$ 、 $Z_g$  分别为试样、水以及玻璃板的声阻抗。

试样底面和玻璃板上表面反射回波信号声压  $p_9$  和  $p_{15}$  的表达式为

$$\begin{aligned} p_9 &= (R_1^2 - 1)R_1 p_0 e^{-2\alpha_w d_1} e^{-2\alpha d_2}, \\ p_{15} &= (R_1^2 - 1)^2 R_2 p_0 e^{-2\alpha_w(d_1+d_3)} e^{-2\alpha d_2}. \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $\alpha_w$  和  $\alpha$  分别为水和试样的衰减系数。需要指出的是, 为了减少声束扩散的影响, 应满足  $N < d_1 + d_2 + d_3 < 1.6N$ , 其中  $N$  为探头近场长度, 并且  $d_3$  应足够小, 以至于既能将  $p_9$  和  $p_{15}$  分辨开, 同时又不会让试样底面的高次回波叠加到水与玻璃底板上表面的一次回波里。

设  $p_9$  和  $p_{15}$  信号的幅值分别为  $A_1$  和  $A_2$ , 则根据式(7)可得

$$\left| \frac{A_2}{A_1} \right| = \frac{e^{-2\alpha_w d_3} (1 - R_1^2) R_2}{R_1} \quad (8)$$

室温下, 可将  $e^{-2\alpha_w d_3}$  看成常数  $D$ , 则式(8)简化成

$$\left| \frac{A_2}{A_1} \right| = D \frac{(1 - R_1^2) R_2}{R_1} \quad (9)$$

将式(6)带入式(9), 有

$$\left| \frac{A_2}{A_1} \right| = D \frac{4Z_c Z_w (Z_g - Z_w)}{(Z_c^2 - Z_w^2)(Z_g + Z_w)} \quad (10)$$

室温下, 水和石英玻璃板的声阻抗  $Z_w$ 、 $Z_g$  分别为  $1.5 \times 10^3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  和  $14.5 \times 10^3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 将其带入式(10), 得

$$\left| \frac{A_2}{A_1} \right| = 3.25D \frac{Z_c Z_w}{Z_c^2 - Z_w^2} \quad (11)$$

令  $|A_2/A_1|/(3.25D) = \kappa$ , 将其带入式(11), 得

$$Z_c = \frac{Z_w \pm Z_w \sqrt{(1 + 4\kappa^2)}}{2\kappa} \quad (12)$$

由于  $Z_c > Z_w$ , 则

$$Z_c = \frac{Z_w + Z_w \sqrt{(1 + 4\kappa^2)}}{2\kappa} \quad (13)$$

即

$$Z_c = 1.5 \times 10^3 \times \frac{1 + \sqrt{(1 + 4\kappa^2)}}{2\kappa} \quad (14)$$

由此可知, 只要实验得到试样底面和玻璃板上表面的反射回波信号的幅值比  $|A_2/A_1|$ , 以及水的衰减系数  $\alpha_w$ , 就可以通过式(14)求出介质的声阻抗。

### 2.3 孔隙率测量

超声检测结束后, 对试样用  $600\# \sim 1500\#$  砂纸研磨至表面无明显划痕, 然后用绒布和粒度为  $1.5 \mu\text{m}$  的抛光膏进行抛光, 直到无任何显微划痕为止。利用德国莱卡公司生产的 MeF4A 金相显微镜对试样截面进行显微观察, 结果如图 2 所示。该仪器根据像素填充原理, 能实现孔隙数量统计<sup>[17]</sup>。对每一个试样的若干视野进行孔隙统计并进行记录和拍照。为了避免不同截面上孔隙面积不同而影响

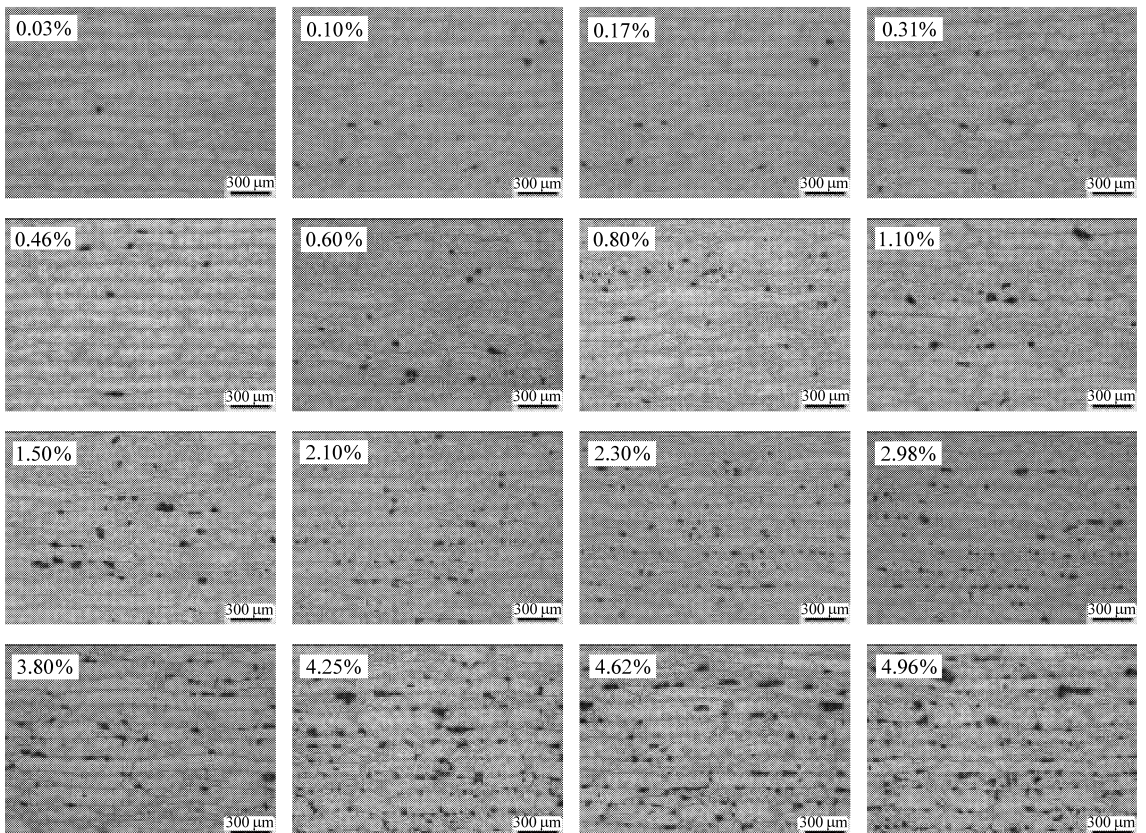


图 2 不同孔隙率试样的金相观察结果

Fig. 2 Microscope-viewed results for samples with different porosities

统计结果, 沿着复合材料层板的横截面方向进行打磨及孔隙率观测。每观察完一个截面, 再将试样磨掉约 0.4 mm 厚度, 重复上述方法 20 次以上, 直到整个试样磨完为止。根据统计学原理, 对这样得到的一系列面积孔隙率值进行换算可得到该试样的体积孔隙率。图 2 为不同孔隙率试样的一组金相观察结果。可以看到, 对于较小的孔隙率, 孔隙尺寸普遍较小, 多数在数十微米左右, 且以球形或扁球形居多。随着孔隙率增加, 孔隙的平均尺寸也随之增加, 除了更多的小孔隙外, 还出现了 100 μm 甚至两三百微米的孔隙。小孔隙形状多为球形或扁球形, 大尺寸孔隙形状趋向于长条状。

### 3 实验结果

#### 3.1 模型建立

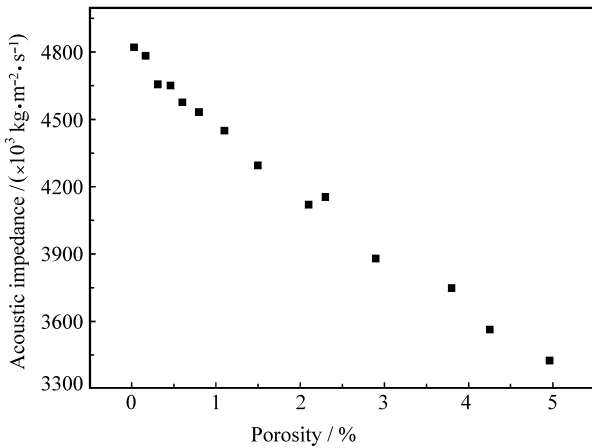


图 3 超声声阻抗与金相法测量的孔隙率之间的关系  
Fig. 3 Relationship between the ultrasonic acoustic impedance and porosity from microscope result

图 3 为实验得到的声阻抗和金相法测得的孔隙率结果, 可以看出, 随着孔隙率增加, 声阻抗逐渐变小。将这些数据代入式(4)并利用最小二乘法求其中的系数  $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ 。其具体求解过程如下: 根据  $Z_c = c_0 P^2 - c_1 P + c_2$ , 按最小二乘法, 有

$$\sum_{n=1}^{14} (Z_c - c_0 P^2 + c_1 P - c_2)^2 = 0 \quad (15)$$

分别对  $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  求导, 得

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{14} (Z_c - c_0 P^2 + c_1 P - c_2) P^2 &= 0, \\ \sum_{n=1}^{14} (Z_c - c_0 P^2 + c_1 P - c_2) P &= 0, \\ \sum_{n=1}^{14} (Z_c - c_0 P^2 + c_1 P - c_2) &= 0. \end{aligned} \quad (16)$$

将式(16)进一步求解可得

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^{14} Z_c P^2 - \sum_{n=1}^{14} c_0 P^4 + \sum_{n=1}^{14} c_1 P^3 - \sum_{n=1}^{14} c_2 P^2 = 0 \\ \sum_{n=1}^{14} Z_c P - \sum_{n=1}^{14} c_0 P^3 + \sum_{n=1}^{14} c_1 P^2 - \sum_{n=1}^{14} c_2 P = 0 \\ \sum_{n=1}^{14} Z_c - \sum_{n=1}^{14} c_0 P^2 + \sum_{n=1}^{14} c_1 P - 14c_2 = 0 \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中未知数为  $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ , 其它参数的数值可以通过对实验数据的计算获得。经进一步求解方程组后得到:  $c_0 = 15.64$ ,  $c_1 = 354.38$ ,  $c_2 = 4812.2$ 。从而得到中心频率 5 MHz 下, 该批次复合材料的声阻抗与孔隙率的检测模型为

$$Z_c = 15.64 P^2 - 354.38 P + 4812.2 \quad (18)$$

式(18)所标定的曲线与实验数据的比较见图 4。总体来看, 标定曲线与实验结果基本符合。零孔隙率试样的声阻抗约为  $4812.2 \times 10^3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 与蒋志峰等<sup>[18]</sup>使用的声阻抗  $4613 \times 10^3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  具有可比性。

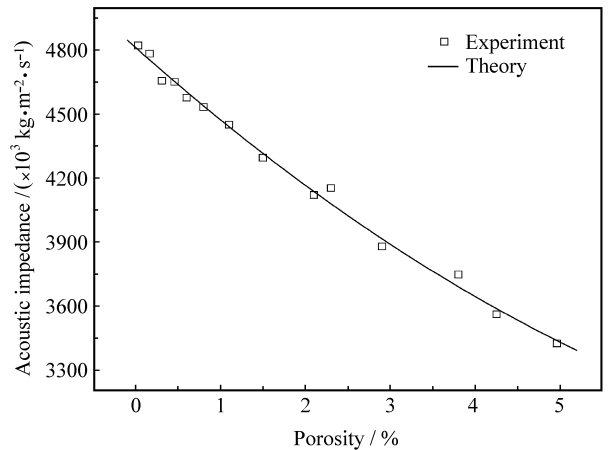


图 4 声阻抗与孔隙率的实验结果及标定曲线  
Fig. 4 Comparison of porosity between the ultrasonic experimental and theoretical results

#### 3.2 实验验证及误差分析

对孔隙率在 0.03%~2.21% 之间的 17 个同一批次成型试样进行声阻抗检测法的实验验证, 与金相法检测孔隙率结果的对比情况如图 5 所示。

进一步对验证实验进行误差分析, 由相对误差结果(图 6)可以看出, 对于实测孔隙率 0.03%~2.21% 范围内的试样, 除孔隙率 0.03% 时相对误差很大以外, 其余测试点的模型预测与实测结果的相对误差均在 0~12.5% 之间变化, 误差大小与孔隙

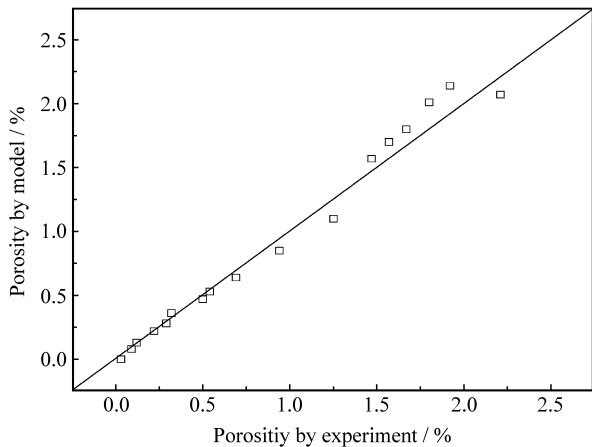


图5 声阻抗法预测孔隙率与金相测试结果比较  
Fig. 5 Comparison of porosity between acoustic impedance model and microscope result

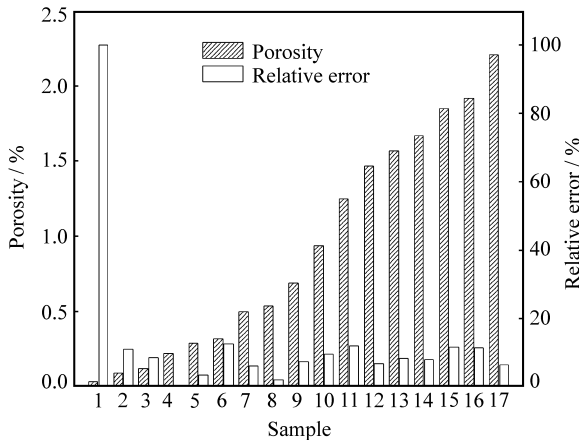


图6 声阻抗法测量孔隙率相对误差分析  
Fig. 6 Relative error of porosity from acoustic impedance method

率范围之间没有明显的相关性。

分析认为, 利用本文中介绍的声阻抗法测量复合材料孔隙率, 不必测量材料的声速和密度, 操作简单、易于实现。同时, 由于孔隙形状、尺寸及分布对材料的声阻抗值影响较小, 对于确定的复合材料制备工艺, 该方法得到的孔隙率测量结果具有较好的可重复性。需要指出的是, 本研究得到的孔隙率与声阻抗之间的数值关系针对的是预浸料热压成型的碳纤维单向增强环氧树脂基复合板, 对于不同的复合材料类型及成型工艺, 须进行具体的实验测试和模型建立研究。

## 4 结 论

(1) 碳纤维增强环氧树脂复合材料的声阻抗与孔隙率之间存在相关性, 随着孔隙率的增加, 复合

材料声阻抗单调下降。

(2) 利用超声底板反射回波法, 不需要单独测量材料的密度和声速即可得到声阻抗值, 进而估算复合材料的孔隙率。

(3) 本研究中给出的声阻抗与孔隙率之间的数值关系只是针对特定类型和成型工艺的复合材料得来的, 实际应用中应根据复合材料类别及特点进行针对性的研究及建模。

## 参考文献:

- [1] Stone D E, Clarke B. Ultrasonic attenuation as a measure of void content in carbon fiber reinforced plastics [J]. Non-destructive Testing International, 1975, 8(3): 137-145.
- [2] Martin B G. Ultrasonic attenuation due to voids in fiber reinforced plastic [J]. Non-destructive Testing International, 1976, 9(5): 242-246.
- [3] Hale J M, Ashton J N. Ultrasonic attenuation in voided fiber reinforced plastics [J]. Non-destructive Testing International, 1988, 21(5): 321-326.
- [4] Jeong H, Hsu D K. Experimental analysis of porosity induced ultrasonic attenuation and velocity change in carbon composites [J]. Ultrasonics, 1995, 33(3): 195-203.
- [5] Hsu D K, Nair S M. Evaluation of porosity in graphite epoxy composite by frequency dependence of ultrasonic attenuation [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1986, 6B: 1185-1193.
- [6] Hsu D K. Ultrasonic measurements of porosity in woven graphite polyimide composites [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1988, 7B: 1063-1068.
- [7] 周晓军, 游红武, 程耀东. 含孔隙碳纤维复合材料的超声衰减模型[J]. 复合材料学报, 1997, 14(3): 99-105.  
Zhou Xiaojun, You Hongwu, Cheng Yaodong. Ultrasonic attenuation model of void contained carbon fiber reinforced plastic [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1997, 14(3): 99-105.
- [8] 周晓军, 莫锦秋, 游红武. 碳纤维复合材料分布孔隙率的超声衰减检测方法[J]. 复合材料学报, 1997, 14(3): 107-113.  
Zhou Xiaojun, Mo Jinqiu, You Hongwu. Ultrasonic attenuation testing method for NDE of void content based on theoretical model and experiment calibration [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1997, 14(3): 107-113.
- [9] Martin B G. Ultrasonic wave propagation in fiber reinforced solids containing voids [J]. Journal of Applied Physics, 1977, 48(8): 3368-3369.
- [10] Reynolds W N, Wilkinson S J. The analysis of fiber reinforced porous composite materials by measurement of ultrasonic wave velocities [J]. Ultrasonics, 1978, 16(4): 159-163.
- [11] Blodgett E D, Thomas III L J, Miller J G. Effect of porosity

- on polar backscatter from fiber reinforced composites [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1986, 5B: 1267-1274.
- [12] Yuhas D E, Vorres C L, Roberts R A. Variations in backscatter attributed to porosity [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1986, 5B: 1275-1284.
- [13] Robert R A. Porosity characterization in fiber reinforced composites by use of backscatter [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1987, 6B: 1147 - 1156.
- [14] Robert R A. Analysis of ultrasonic backscatter for porosity characterization in graphite epoxy [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1987, 8B: 1559 - 1566.
- [15] Grolemond D, Tsai C S. Statistical moments of backscattered ultrasound in porous fiber reinforced composites [J]. IEEE Trans on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 1998, 45(2): 295-296.
- [16] Birt E A, Smith R A. A review of NDE methods for porosity measurement in fiber reinforced polymer composites [J]. Non-destructive Testing and Condition Monitoring, 2004, 46(11): 681-686.
- [17] Daniel I M, Wooh S C, Komsky I. Quantitative porosity characterization of composite materials by means of ultrasonic attenuation measurements [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1992, 11(1): 1-8.
- [18] 蒋志峰, 吴作伦, 刘继忠. 基于超声频域分析的碳纤维复合材料孔隙率检测[J]. 计量学报, 2006, 27(1): 53-56.  
Jiang Zhifeng, Wu Zuolun, Liu Jizhong. Testing of void content in carbon fibre reinforced composite materials based on spectrum analysis [J]. Acta Metrologica Sinica, 2006, 27(1): 53-56.