

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.051

# 碳纤维复合材料超声脉冲反射信号频域建模\*

陈越超<sup>1</sup> 杨辰龙<sup>1</sup> 周晓军<sup>1</sup> 李 钊<sup>1</sup> 郑慧峰<sup>2</sup>

(1. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027; 2. 中国计量学院计量测试工程学院, 杭州 310018)

**摘要:** 对碳纤维复合材料(CFRP)层板超声脉冲反射信号频域进行研究,首先分析了CFRP层板中纤维层和树脂层的声波反射系数频域特征,结果表明,正常纤维层和树脂层、含孔隙纤维层和厚树脂层对反射系数有不同的影响。在此基础上建立了CFRP层板超声脉冲反射信号频域模型,反射信号频谱由正常纤维/树脂层频响、含孔隙纤维层频响、厚树脂层频响、探头频响以及噪声信号频响组成。使用该模型对含孔隙和无孔隙CFRP层板分别进行数值模拟,得到的频谱和对应CFRP层板实验信号频谱相比,两者主要频率成分具有一致性。

**关键词:** 碳纤维复合材料 孔隙检测 超声脉冲反射法 频域

**中图分类号:** TB553; TB33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)11-0330-07

## 引言

碳纤维复合材料(CFRP)具有高强度、高硬度和密度小等特点,在航空航天、车辆等领域中得到广泛应用的同时,对碳纤维复合材料内部缺陷的检测也备受关注<sup>[1]</sup>。由于独特的制造和成型工艺,CFRP容易出现孔隙、富树脂、分层和脱粘等缺陷<sup>[2]</sup>。其中孔隙是CFRP中最为常见和最重要的微观缺陷,其形状、大小和体积分数对复合材料的物理性能和机械性能具有重要影响<sup>[3-4]</sup>。而富树脂也是CFRP中常见的微观缺陷。超声波无损检测是评价材料内部缺陷的重要手段<sup>[5]</sup>,因此国内外学者建立了多种CFRP微观缺陷超声检测模型,主要有声速法<sup>[6]</sup>、时域及频域衰减法<sup>[7-10]</sup>、声阻抗法<sup>[11]</sup>和背散射法<sup>[12-13]</sup>等。其中对检测信号频域的研究主要集中在衰减上,并没有对信号频谱组成成分进行深入分析。本文通过分析超声波在复合材料层界面上的反射系数,得到孔隙和富树脂对频谱的不同影响,进而建立CFRP超声脉冲反射信号频域响应模型。

## 1 CFRP 超声反射系数频域特征

### 1.1 反射系数频域理论模型

CFRP层板是由纤维和树脂间隔铺层成型的。当频率接近CFRP层板某阶固有共振频率的超声波

入射到层板内时,层板将与该阶共振频率发生共振<sup>[14]</sup>,此时背散射信号频率将达到该阶共振频率,因此材料共振对于信号频谱有重要影响。纤维层和树脂层由于密度和材料声速等参数的不同,对CFRP层板共振有不同的影响。而孔隙和富树脂的出现则会改变材料的原有共振形态,并且有着不同的表现形式。因此对声波在CFRP中的反射系数进行研究,可以得到纤维层和树脂层的反射系数以及孔隙和富树脂对反射系数的影响。

先对声波在纤维层和树脂层间的复杂反射和透射情况进行研究。当平面声波入射到两种介质的界面时,其反射系数 $r$ 和透射系数 $t$ 分别为

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

$$t = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

式中  $Z_1$ ——第1种介质声阻抗

$Z_2$ ——第2种介质声阻抗

对于平面入射波,声压可表示为

$$p_i(t, x) = P_0 e^{i(\omega t - kx) - \alpha x} \quad (3)$$

式中  $p_i(t, x)$ ——在某一时刻和位置的声压

$\omega$ ——声波角频率

$P_0$ ——在介质界面处的声压(即 $x=0$ 处)

$k$ ——波数  $\alpha$ ——衰减系数

再分析声波从树脂层入射到纤维层的情况。对

收稿日期: 2013-12-12 修回日期: 2014-02-11

\* 国家自然科学基金资助项目(51075358)、浙江省自然科学基金资助项目(LQ12E05018、LY14E050013)和浙江省仪器科学与技术学科开放基金资助项目(JL130112)

作者简介: 陈越超, 博士生, 主要从事无损检测及其自动化研究, E-mail: cyczju07@126.com

通讯作者: 杨辰龙, 副教授, 主要从事复合材料超声检测及成像研究, E-mail: yclzju@163.com

于树脂-纤维-树脂的 3 层结构,声波的反射和透射如图 1 所示。图中  $r_{rf}$  和  $r_{fr}$  分别为声波从树脂到纤维和从纤维到树脂的反射系数,  $t_{rf}$  和  $t_{fr}$  分别为声波从树脂到纤维和从纤维到树脂的透射系数。

第  $m$  次反射波的声压  $P_m$  可表示为

$$P_m = P_0 r_{fr}^m t_{rf} r_{rf}^{m-1} t_{fr} e^{imk_f d_f} \quad (4)$$

式中  $e^{im2k_f d_f}$ ——反射波的相位变化

$k_f$ ——纤维层中波数

$d_f$ ——纤维层厚度

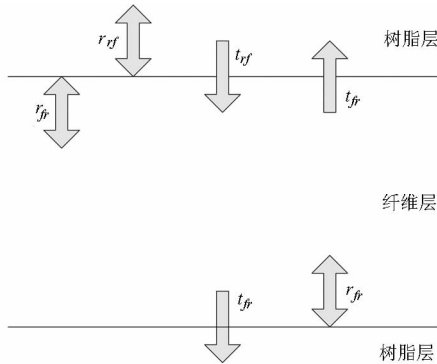


图 1 树脂-纤维-树脂结构中声波的反射和透射

Fig. 1 Acoustic wave reflection and transmission in resin-fiber-resin structure

当声波在图示层状结构中的反射和透射次数趋向无穷多时,声波在纤维层上的总反射声压系数  $r_1$  可表示为

$$r_1 = \frac{\sum_{m=1}^{\infty} P_m}{P_0} \quad (5)$$

由此可以得到纤维层反射系数  $r_1(\omega)$  为

$$r_1(\omega) = \frac{(r_{rf} + r_{fr} e^{-2\alpha_1 d_f})^2 - 4r_{fr} r_{rf} e^{-2\alpha_1 d_f} \sin^2\left(\frac{\omega d_f}{c_f}\right)}{(1 + r_{fr} r_{rf} e^{-2\alpha_1 d_f})^2 - 4r_{fr} r_{rf} e^{-2\alpha_1 d_f} \sin^2\left(\frac{\omega d_f}{c_f}\right)} \quad (6)$$

式中  $c_f$ ——纤维中超声波声速

$\alpha_1$ ——纤维层中超声衰减系数

同样,可以得到纤维-树脂-纤维结构中树脂层的反射系数  $r_2(\omega)$  为

$$r_2(\omega) = \frac{(r_{fr} + r_{rf} e^{-2\alpha_2 d_r})^2 - 4r_{rf} r_{fr} e^{-2\alpha_2 d_r} \sin^2\left(\frac{\omega d_r}{c_r}\right)}{(1 + r_{rf} r_{fr} e^{-2\alpha_2 d_r})^2 - 4r_{rf} r_{fr} e^{-2\alpha_2 d_r} \sin^2\left(\frac{\omega d_r}{c_r}\right)} \quad (7)$$

式中  $c_r$ ——树脂中超声波声速

$d_r$ ——树脂层厚度

$\alpha_2$ ——树脂层中超声衰减系数

这样就得到了超声波在纤维层和树脂层的理论

反射系数。

## 1.2 反射系数频域特征

先分析孔隙对反射系数的影响,在 CFRP 中,孔隙主要出现在层间或纤维层内,由于纤维层厚度比树脂层厚度大得多,这样出现在层间的孔隙主要在层间靠近纤维层的一侧。因此分析模型采用树脂-纤维-树脂结构。孔隙的出现会导致材料中声速下降以及材料密度变小,从而对反射系数造成影响。对声波在树脂-纤维-树脂结构中的反射系数进行数值计算,其中声速随孔隙率的变化参考 Jeong 等的实验结果<sup>[6]</sup>,纤维和树脂的密度参考 Martin 的实验结果<sup>[15]</sup>。取纤维层厚度为 125  $\mu\text{m}$ ,树脂层厚度为 5  $\mu\text{m}$ 。得到的反射系数数值计算结果如图 2 所示,其中  $P$  代表孔隙率大小,反射系数幅值由大到小对应  $P = 25\%$ ,  $P = 20\%$ ,  $P = 0$ ,  $P = 15\%$ ,  $P = 3\%$ ,  $P = 5\%$ 。

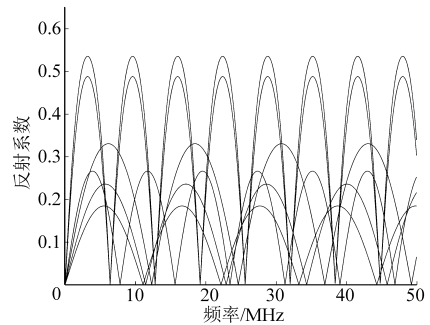


图 2 孔隙率对反射系数的影响

Fig. 2 Porosity effect on the reflection coefficient

从图中可以看到,当孔隙率为 0% 时,反射系数变化周期为 12 MHz,即与层板固有共振频率的变化周期相近。随着孔隙率变大,反射系数变化周期呈减小趋势,从 12 MHz 逐渐下降到 6 MHz,即变化周期从原共振频率周期降为原共振频率周期的一半。而反射系数幅值则呈先减小后增大的趋势。因此孔隙会显著改变材料的共振频率及变化周期。原因可能为树脂和纤维的声阻抗非常接近,因此纤维层声阻抗由于孔隙而产生的微小下降可以导致树脂-纤维的反射系数产生较大的改变,从而改变声波的反射和透射。通常使用的超声波频率在 15 MHz 以内,此时孔隙的存在会导致共振频率下降。

再分析富树脂对反射系数的影响。在 CFRP 中富树脂的表现形式多为某些树脂层厚度相对正常的树脂层明显偏大,因此通过改变树脂层的厚度来得到富树脂。数值计算模型采用纤维-树脂-纤维模型。树脂层厚度变化范围为 5 ~ 25  $\mu\text{m}$ ,得到的数值计算结果如图 3 所示。随着树脂层厚度增大,反射系数变化周期也逐渐减小。但是树脂层的反射系数

变化周期远大于纤维层反射系数变化周期,在频率较低时反射系数变化并没有表现出完整的周期性。尤其是在树脂层厚度较小时,反射系数随频率呈近似线性增大。反射系数幅值则随树脂层厚度增大而保持不变。

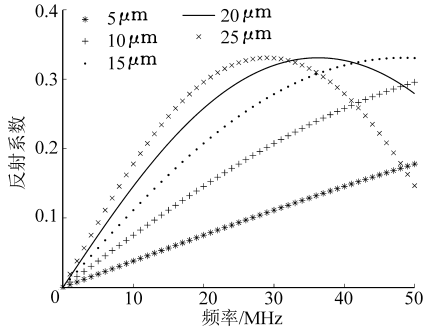


图3 树脂厚度对反射系数的影响

Fig. 3 Resin thickness effect on the reflection coefficient

通过对声波反射系数进行建模和数值计算分析,可以得出纤维层和树脂层对反射系数有不同的影响。在正常情况下,纤维层厚度要远大于树脂层厚度,因此纤维层的共振频率对材料的共振起主要作用。当纤维层出现孔隙或树脂层变厚时,均会导致反射系数变化周期变小,但由于纤维层共振对材料共振起主导作用,孔隙对共振频率的影响更大。在低频范围内(小于30 MHz),树脂层的反射系数随频率近似呈线性增大,树脂层变厚则使线性增长斜率变大。

## 2 CFRP 超声脉冲反射信号频域模型

在通常的检测信号频率范围内,纤维与树脂、孔隙与富树脂对信号反射系数有不同的影响,因此分别考虑上述参数对信号频谱的影响。

参考 Mienczakowski 等<sup>[16]</sup>得出的经验公式,当声波入射到薄层时,薄层的频率响应  $H(\omega)$  可表示为

$$H(\omega) = \frac{|(Z_2 - Z_1)(Z_2 + Z_1) \tan(kd)|}{\sqrt{4Z_2^2 Z_1^2 + (Z_2^2 + Z_1^2)^2 \tan^2(kd)}} \quad (8)$$

式中  $d$ ——该薄层介质的厚度

因此正常纤维层的频率响应  $S(\omega)$  可表示为

$$S(\omega, d_f) = \frac{|(Z_f - Z_r)(Z_f + Z_r) \tan\left(\frac{\omega d_f}{c_f} + \phi_1\right)|}{\sqrt{4Z_f^2 Z_r^2 + (Z_f^2 + Z_r^2)^2 \tan^2\left(\frac{\omega d_f}{c_f} + \phi_1\right)}} \quad (9)$$

式中  $Z_f$ ——纤维层声阻抗

$Z_r$ ——树脂层声阻抗

$\phi_1$ ——正常纤维层声波传播相位变化角

同理正常树脂层的频率响应  $C(\omega)$  为

$$C(\omega, d_r) = \frac{|(Z_r - Z_f)(Z_r + Z_f) \tan\left(\frac{\omega d_r}{c_r} + \phi_2\right)|}{\sqrt{4Z_r^2 Z_f^2 + (Z_r^2 + Z_f^2)^2 \tan^2\left(\frac{\omega d_r}{c_r} + \phi_2\right)}} \quad (10)$$

式中  $\phi_2$ ——正常树脂层声波传播相位变化角

对于正常树脂层,其厚度一般很小,在较低频率范围内,有  $\frac{\omega d_r}{c_r} \ll 1$  和  $\phi_2$  趋向于 0,  $C(\omega)$  可简化为

$$C(\omega, d_r) = \frac{(Z_r - Z_f)(Z_r + Z_f)}{2Z_f Z_r} \frac{\omega d_r}{c_r} \quad (11)$$

在低频范围内,正常树脂层的频响随频率呈线性变化,这和 1.2 节中得出的正常树脂层反射系数变化相符合。对于正常成型的复合材料纤维层和树脂层,产生的频响可表示为  $S(\omega, d_f) C(\omega, d_r)$ 。采用 1.2 节中的材料特性参数,可以得到如图 4 所示的正常纤维/树脂层频率响应。可以看到,纤维层频响对于总频响有着决定性作用,树脂层频响只是使频响的幅值增大。

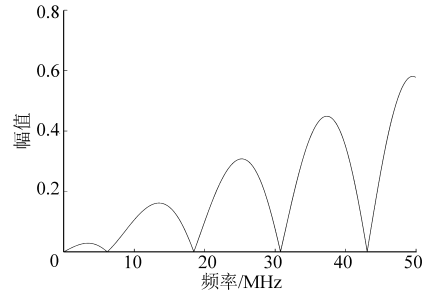


图4 正常纤维/树脂层的频率响应

Fig. 4 Frequency response of normal fiber/resin layer

当纤维层中孔隙含量增大时,该纤维层的共振频率周期逐渐减小到原来的一半。同样可以得到含孔隙纤维层的频率响应  $P(\omega)$  为

$$P(\omega, d_f) = \frac{|(Z_f - Z_r)(Z_f + Z_r) \tan\left(\frac{\omega d_f}{c_f} + \phi_3\right)|}{\sqrt{4Z_f^2 Z_r^2 + (Z_f^2 + Z_r^2)^2 \tan^2\left(\frac{\omega d_f}{c_f} + \phi_3\right)}} \quad (12)$$

式中  $\phi_3$ ——含孔隙纤维层声波传播相位变化角

图 5 为某 20% 孔隙率纤维层的频率响应,其中材料特性参数与 1.2 节中相同。

同样,厚树脂层对频率响应的影响  $R(\omega)$  为

$$R(\omega, d_r) = \frac{|(Z_r - Z_f)(Z_r + Z_f) \tan\left(\frac{2\omega d_r}{c_r} + \phi_4\right)|}{\sqrt{4Z_r^2 Z_f^2 + (Z_r^2 + Z_f^2)^2 \tan^2\left(\frac{2\omega d_r}{c_r} + \phi_4\right)}} \quad (13)$$

式中  $\phi_4$ ——厚树脂层声波传播相位变化角

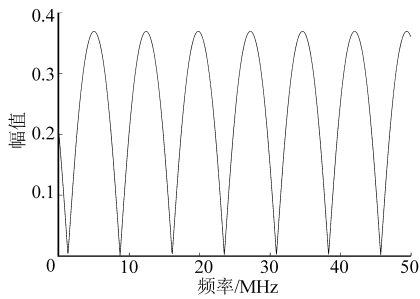
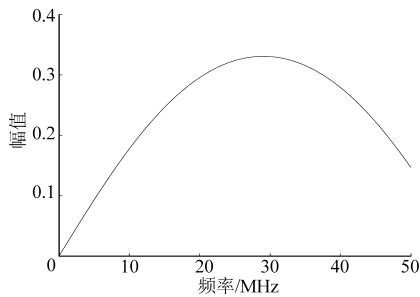


图 5 20% 孔隙率纤维层的频率响应

Fig. 5 Frequency response of fiber layer with 20% porosity

图 6 为 25  $\mu\text{m}$  厚度树脂层的频率响应, 材料特性参数与 1.2 节中相同。

图 6 25  $\mu\text{m}$  厚度树脂层的频率响应Fig. 6 Frequency response of resin layer with 25  $\mu\text{m}$  thick

这样就得到了正常纤维/树脂层、含孔隙纤维层和厚树脂层的频率响应。对于通常的 CFRP 层板, 由正常纤维/树脂层的频响  $S(\omega, d_f)C(\omega, d_r)$ 、含孔隙纤维层频响  $P(\omega)$ 、厚树脂层频响  $R(\omega)$ 、探头频响  $T(\omega)$  以及噪声信号频响  $N$  组成其频率响应。反射信号的频谱  $F(\omega)$  表示为

$$F(\omega) = \frac{A_0 T^2(\omega)}{n} \left( \lambda n_1 S(\omega, d_f) C(\omega, d_r) + \mu \sum_{i=1}^{n_2} P_i(\omega, d_f) + \eta \sum_{j=1}^{n_3} R_j(\omega, d_r) \right) + N \quad (14)$$

式中  $n_1, n_2, n_3$ ——正常纤维/树脂层、含孔隙纤维层和厚树脂层的数量

$n$ ——CFRP 层板层数

$A_0$ ——探头频响系数

$\lambda, \mu, \eta$ ——正常纤维/树脂层、含孔隙纤维层和厚树脂层的干扰系数, 由 CFRP 层板成型工艺和层数决定

### 3 CFRP 超声脉冲反射信号频域模型数值模拟与实验对比

#### 3.1 超声脉冲反射信号频域模型数值模拟

使用上述反射信号频域模型对反射信号频谱进行仿真。因富树脂对反射信号频谱的影响远小于孔隙, 而且在 CFRP 中孔隙比富树脂更为常见, 因此对含孔隙 CFRP 层板反射信号频谱进行数值模拟, 材

料特性参数使用 1.2 节中的数据, 模拟探头发射频率为 10 MHz, CFRP 层板为 24 层, 孔隙率为 8%。孔隙在纤维层中均匀分布。同时也对探头声场以及相同参数下无缺陷 CFRP 层板的反射信号频谱进行数值模拟。

图 7a 所示为探头频响, 图 7b 所示为无缺陷 CFRP 层板的反射信号频谱。可以看到, 由于正常纤维/树脂层的共振影响, 图 7b 中频谱的中心发生了偏移, 产生了频率为 12 MHz 左右的共振频率成分。

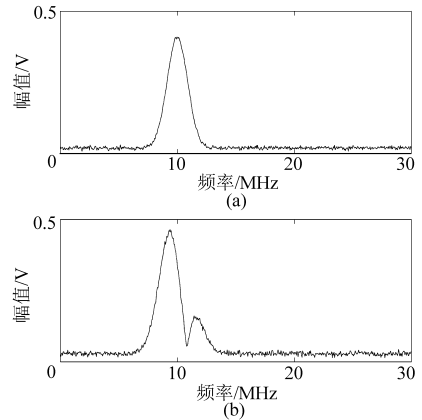
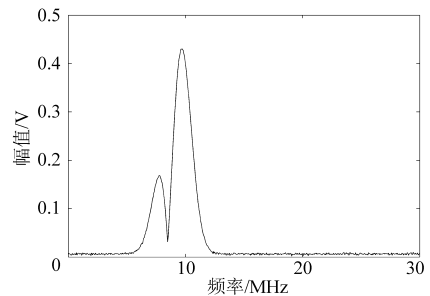


图 7 CFRP 层板反射信号仿真频谱

Fig. 7 Simulation spectrum of CFRP laminate reflected signal

(a) 探头频响 (b) 无缺陷 CFRP 反射信号频响

图 8 所示为 CFRP 层板含孔隙时的反射信号模拟频谱, 从图中可以看到, 由于孔隙的存在使纤维层共振频率降低, 导致频谱上出现了 8 MHz 左右的频率成分。

图 8 含孔隙缺陷 CFRP 层板反射信号仿真频谱  
Fig. 8 Simulation spectrum of void containing CFRP laminate reflected signal

#### 3.2 超声脉冲反射实验信号频谱

##### 3.2.1 实验设备与试块

对 CFRP 层板进行检测得到对比信号频谱。实验设备原理图如图 9 所示, 实验系统主要由超声波探头、超声采集卡、工控机和显示器组成。超声波探头选用奥林巴斯 Harisonic 水浸聚焦探头, 中心频率为 10 MHz。超声采集卡采用 PCIUT3100。图 10 所示为该 CFRP 层板超声信号采集实现设备。

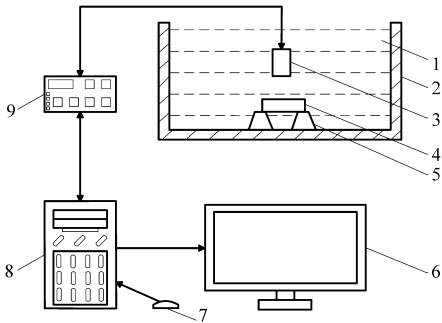


图9 实验设备原理图

Fig.9 Schematic of ultrasonic testing system

1. 水 2. 水槽 3. 超声波探头 4. 试块 5. 支架 6. 显示器  
7. 鼠标 8. 工控机 9. 超声采集卡



图10 CFRP层板超声信号采集实验设备

Fig.10 Ultrasonic signal acquisition facility for CFRP laminate

CFRP laminate

实验试块为两块由某飞机制造公司提供的采用热压成型的 CFRP 层板,试块层数均为 24 层,每层厚度均为  $125\ \mu\text{m}$ 。试块孔隙率分别为 0.2% 和 7.74%,事先由金相实验法获取。

### 3.2.2 CFRP 层板实验信号频谱分析

使用 3.2.1 节中的设备采集 CFRP 层板的超声脉冲反射信号,将采集的信号进行 FFT 得到检测信号频谱。图 11a 所示为实验超声波探头频响,图 11b 所示为孔隙率为 0.2% 试块的实验信号频谱。由于该试块孔隙率非常低,可以将该试块近似看作无孔隙缺陷 CFRP 层板试块。结果表明在纤维/树脂层共振的影响下,图 11b 中的频谱中出现了 12 MHz 左右的频谱成分,这和图 7b 中的仿真信号频谱特点相一致。孔隙率为 7.74% 试块的实验信号频谱如图 12 所示。结果表明,由于孔隙的影响,在频谱中出现了频率为 7~8 MHz、幅值较大的频谱成分,这个结果和图 8 中的仿真结果相近。从以上实验结果可以看出,对于无孔隙和含孔隙 CFRP 层板,其反射信号仿真频谱和对应实验频谱均有相同的变化趋势。

对于实际的 CFRP 层板,其纤维和树脂层的厚度并不完全是定值,孔隙和富树脂在层板内的分布也具有随机性,再加上外界随机噪声干扰等因素,使

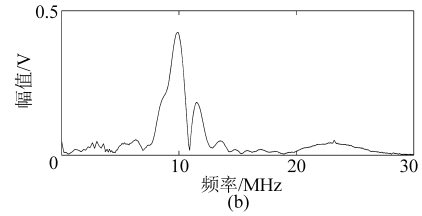
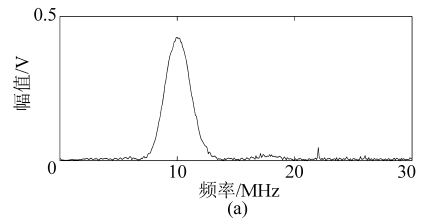


图11 CFRP层板反射信号实验频谱

Fig.11 Experimental spectrum of CFRP laminate reflected signal

(a) 探头频响 (b) 无缺陷 CFRP 反射信号频响

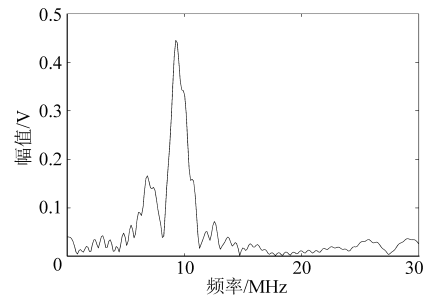


图12 含孔隙缺陷 CFRP 层板反射信号实验频谱

Fig.12 Experimental spectrum of void containing CFRP laminate reflected signal

得实际反射信号频谱会比数值模拟的结果复杂的多。图 12 中频谱除了 8 MHz 和 10 MHz 左右的频率成分,还有 12 MHz 左右的频率成分,这是由于孔隙在试块内随机分布,在无孔隙的纤维层处产生了 12 MHz 频率的共振。并且由于实际试块本身的复杂性和外界的随机干扰,使得图 11b 和图 12 中的频谱还有不少幅值较大的随机频率成分。但是数值仿真结果可以正确反映 CFRP 层板中纤维/树脂层共振和纤维层中孔隙对反射信号频谱的影响,对于建立正确的 CFRP 层板超声脉冲反射信号频域模型具有一定指导意义。

## 4 结论

(1) 对 CFRP 层板中纤维层和树脂层的声波反射系数进行频域分析,结果表明随着孔隙率增大,纤维层的声波反射系数变化周期逐渐变小并最终降为原来的一半。在较低频率范围内,树脂层的声波反射系数随频率近似呈线性增大,树脂层变厚使得该直线斜率变大。

(2) 建立了 CFRP 层板超声脉冲反射信号频域模型,信号频谱由正常纤维/树脂层的频响、含孔隙纤维层频响、厚树脂层频响、探头频响以及噪声信号

频响组成。使用该模型分别对无孔隙和含孔隙 CFRP 层板的反射信号频谱进行数值模拟,得到的频谱与对应 CFRP 层板实验信号频谱的变化趋势相

一致,表明该模型对于预测 CFRP 层板超声脉冲反射信号频谱具有一定可行性。

### 参 考 文 献

- Birt E A, Smith R A. A review of NDE methods for porosity measurement in fiber-reinforced polymer composites[J]. *Insight, Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2004, 46(11): 681 - 686.
- 胡宏伟,李雄兵,杨岳,等. CFRP 复杂型面构件的孔隙率超声检测方法[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2012, 43(4): 1315 - 1319.  
Hu Hongwei, Li Xiongbing, Yang Yue, et al. Method of inspecting porosity in CFRP with complex surface by ultrasonic[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2012, 43(4): 1315 - 1319. (in Chinese)
- Judd N C W, Wright W W. Voids and their effects on the mechanical properties of composites—an appraisal[J]. *SAMPE Journal*, 1978, 14: 10 - 14.
- 刘继忠,蒋志峰,华志恒. 含孔隙形态分布特征的孔隙率超声衰减测试建模[J]. *航空材料学报*, 2006, 26(2): 67 - 71.  
Liu Jizhong, Jiang Zhifeng, Hua Zhiheng. A morphological study based ultrasonic attenuation model of carbon fiber reinforced plastics porosity testing[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(2): 67 - 71. (in Chinese)
- 张杨,周晓军,杨辰龙,等. 基于声束追踪的变厚度曲面工件超声探头位姿规划[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(9): 230 - 234.  
Zhang Yang, Zhou Xiaojun, Yang Chenlong, et al. Ultrasonic probe position and orientation planning for curved components with variable thickness based on ultrasonic beam analysis [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(9): 230 - 234. (in Chinese)
- 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.
- Stone D E W, Clarke B. Ultrasonic attenuation as a measure of void content in carbon-fiber reinforced plastics[J]. *Nondestructive Testing*, 1975, 8(3): 137 - 145.
- Jeong H. Effects of voids on the mechanical strength and ultrasonic attenuation of laminated composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 1997, 31(3): 276 - 292.
- 华志恒,周晓军,李凌. 碳纤维复合材料对超声衰减的频域分析[J]. *复合材料学报*, 2006, 23(2): 123 - 127.  
Hua Zhiheng, Zhou Xiaojun, Li Ling. Frequency spectral analysis for the ultrasonic attenuation of carbon fiber reinforced plastics [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(2): 123 - 127. (in Chinese)
- Nair S M, Hsu D K, Rose J H. Porosity estimation using the frequency dependence of the ultrasonic attenuation[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1989, 8(1): 13 - 26.
- 林莉,罗明,郭广平,等. 碳纤维复合材料孔隙率超声声阻抗法检测[J]. *复合材料学报*, 2009, 26(3): 105 - 110.  
Lin Li, Luo Ming, Guo Guangping, et al. Ultrasonic determination of carbon fiber composite porosity using acoustic impedance [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2009, 26(3): 105 - 110. (in Chinese)
- Kim K B, Hsu D K, Daniel J B. Estimation of porosity content of composite materials by applying discrete wavelet transform to ultrasonic backscattered signal[J]. *NDT&E International*, 2013, 56(10): 10 - 16.
- Karabutov A A, Podymova N B. Nondestructive porosity assessment of CFRP composites with spectral analysis of backscattered laser-induced ultrasonic pulses[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2013, 32(3): 315 - 324.
- Dominguez N, Mascarot B. Ultrasonic non-destructive inspection of localized porosity in composite materials[C]//9th European Conference on Non-Destructive Testing, 2006.
- Martin B G. Ultrasonic attenuation due to voids in fiber-reinforced plastics[J]. *Non-destructive Testing International*, 1976, 9(5): 242 - 246.
- Mienczakowski M. Advanced ultrasonic NDE of composite airframe components: physics, modelling and technology [D]. Nottingham: The University of Nottingham, 2010.

## Ultrasonic Pulse-echo Model for Carbon Fiber Reinforced Polymer in Frequency Domain

Chen Yuechao<sup>1</sup> Yang Chenlong<sup>1</sup> Zhou Xiaojun<sup>1</sup> Li Zhao<sup>1</sup> Zheng Huifeng<sup>2</sup>

(1. The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The frequency domain of ultrasonic pulse-echo signal obtained from carbon fiber reinforced polymer (CFRP) was studied. First the frequency domain feature of reflection coefficient for the fiber layer and resin layer in CFRP laminate was analyzed. The result shows that normal and porous fiber layer, and normal and thick had different influence on the acoustic reflection coefficient. Based on the result above, the frequency domain model for the pulse echo signal acquired from CFRP laminate was established. The pulse-echo signal spectrum was composed of normal fiber/resin layer response, porous fiber layer response, thick resin layer response, probe response and noise signal response. Then the numerical simulation of CFRP laminate was implemented based on the model. The simulation signal spectrum of CFRP laminate with voids as well as the spectrum of CFRP laminate without voids was obtained. The results show that the simulation signal spectrums had the same main frequency components with the corresponding experimental signal spectrums.

**Key words:** Carbon fiber reinforced polymer    Void testing    Ultrasonic pulse echo method    Frequency domain

(上接第 249 页)

## Temperature Prediction of Yam under Infrared Drying Based on Neural Networks

Zhang Lili<sup>1,2</sup>    Wang Xiangyou<sup>2</sup>    Zhang Haipeng<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. School of Agriculture and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** Infrared drying experiments were carried out and the temperature data of yam were collected under different infrared intensities and infrared distances. The experiment results showed that the infrared intensity, infrared distance and drying time played an important role on the surface temperature and internal temperature of yam. Thus, infrared intensity, infrared distance and drying time were chosen as the input layers vectors of BP neural network model. A  $3 \times 9 \times 1$  single hidden layer BP network model was established. The model was trained by steepest gradient descent method and Levenberg – Marquardt algorithm respectively based on temperature data of yam. The maximum prediction error of optimized network model using Levenberg – Marquardt algorithm was  $1.3^{\circ}\text{C}$ , while the traditional algorithm of BP neural network was  $5.7^{\circ}\text{C}$ . It was indicated that Levenberg – Marquardt optimization method was superior to the steepest gradient descent method in the predicting temperature of yam with high precision. Therefore, it is feasible to predict temperature variations of materials during infrared drying process by using BP neural network model optimized by L – M algorithm.

**Key words:** Yam    Infrared drying    Temperature    Levenberg – Marquardt algorithm    Neural network