

提高碳纤维增强树脂基复合材料弹性常数 超声表征精度的方法

苏慧敏, 罗忠兵, 曹欢庆, 周伯堃, 林莉*

(大连理工大学 无损检测研究所, 大连 116085)

摘要: 为提高碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)单向板弹性常数的超声表征精度, 基于超声液浸背反射法开展了实验测量和数值模拟。首先, 搭建了角度旋转测试装置, 并结合信号互相关处理技术实现了不同方向上的延时测量和声速计算; 然后, 通过模拟退火优化算法反演声速数据, 得到了5个独立弹性常数; 最后, 利用理论计算和CIVA软件模拟仿真对实验测量结果进行了验证。结果表明: 1-3平面内准纵波和准横波声速随入射角度而变化, 与1-2平面内的表现出明显差异, 由此显示材料为横观各向同性的; 独立弹性常数分别为12.88、6.39、126.83、4.85、2.97 GPa; 理论计算、CIVA软件模拟仿真及实验测量结果的声速偏差小于6.4 m/s, 实验数据波动范围小于0.33%, 对应的弹性常数误差均小于0.47%。相关方法同样适用于其他正交各向异性介质的弹性常数测试。

关键词: 碳纤维增强树脂基复合材料; 弹性常数; 无损; 超声; 表征精度

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2016)11-2510-07

碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)由于具有高比强度、高比刚度且耐腐蚀等优异性能, 被广泛应用于航空航天领域。其中, 弹性常数作为基本的材料参数, 对开展力学和声学等物理场计算十分关键^[1-3]。然而, 计算结果往往会对输入参数具有很大的依赖性, 较小的弹性常数误差可能会产生较大的计算偏差, 例如5%的弹性常数变化会使板材中超声兰姆波相速度变化超过10%^[4-5]。因此, 准确表征材料的弹性常数对CFRP的设计、制造、检测与评估都是十分重要的。

然而, 由于材料自身的弹性各向异性, 准确测量CFRP的弹性常数非常困难。传统的力学测试如拉伸或弯曲等方法原理简单, 实验测试装置成熟, 但对试样具有破坏性, 测试成本高, 且部分参数(如非轴向弹性模量)难以测量, 数据波动性大, 因此必须发展无损且准确的测试方法。超声法是20世纪70年代逐渐发展起来的一种测试技术, 这一技术基于介质不同方向上的声速计算弹性常数,

成本低且对试样无破坏, 从而得到了研究者的普遍关注^[6]。近年来, 国内外的研究工作主要集中于改进声速测量方法和发展快速稳定的反演算法这2个方面, 以提高弹性常数的测量精度。Markham^[7]提出利用超声液浸法代替直接接触法, 避免了复杂的试样截取, 使声波斜入射变得简单, 在此基础上先后发展出透射法、反射法和背反射法, 有效地提高了声速测量精度^[8-10]。Chu和Rokhlin^[11]提出测量多个角度下的声速并结合非线性最小二乘优化算法反演得到平板复合材料弹性常数的方法, 但该算法对初值依赖性过高; Balasubramaniam等^[12]引入基于全局优化的遗传算法, 降低了初始估计值依赖性, 但存在过早收敛等问题。目前, 针对纤维增强复合材料的弹性常数反演精度并不理想, 如弹性常数 C_{13} 、 C_{33} 、 C_{44} 的误差分别为9.13%、1.77%和21.2%^[12], 个别结果甚至分别达到8.97%、0.88%和28.6%^[13]。因此, 如何提高CFRP弹性常数超声表征方法的测量及反演精度仍需深入研究。

收稿日期: 2015-11-02; 录用日期: 2016-02-13; 网络出版时间: 2016-03-15 15:35

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20160315.1535.050.html

基金项目: 国家“973”计划(2014CB046505); 中央高校基本科研业务费专项资金(DUT14RC(4)18)

通讯作者: 林莉, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为材料无损检测与评价。 E-mail: linli@dlut.edu.cn

引用格式: 苏慧敏, 罗忠兵, 曹欢庆, 等. 提高碳纤维增强树脂基复合材料弹性常数超声表征精度的方法[J]. 复合材料学报, 2016, 33(11): 2510-2516. SU H M, LUO Z B, CAO H Q, et al. Improve methods for elastic constants ultrasonic characterization accuracy of carbon fiber reinforced plastics[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(11): 2510-2516 (in Chinese).

笔者以 CFRP 单向板为对象, 基于超声液浸背反射法研究提高弹性常数测量及反演精度的方法, 从测试装置、延时提取和弹性常数反演 3 个方面开展工作, 并结合数值模拟和力学测试实现 CFRP 弹性常数表征结果的验证, 以期为 CFRP 构件设计、制造及检测评估提供基础数据。

1 原 理

CFRP 单向板及坐标系如图 1 所示。CFRP 单向板可认为是横观各向同性的, 建立如图 1 所示的坐标系, 假设纤维方向与 3 轴平行, 则其弹性性质可用 5 个独立弹性常数 C_{11} 、 C_{13} 、 C_{33} 、 C_{44} 和 C_{66} 表示。超声波在各向异性介质中的传播与材料的弹性常数和密度密切相关, 其关系可由 Christoffel 方程描述^[6]:

$$(\boldsymbol{\Gamma}_{ik} - \rho v^2 \boldsymbol{\delta}_{ik}) \mathbf{u}_k = 0 \quad (1)$$

$$\begin{vmatrix} C_{11}l_1^2 + C_{44}l_3^2 & C_{66}l_2^2 - \rho v^2 & (C_{11} - C_{66})l_1l_2 \\ (C_{44} + C_{66})l_1l_2 & C_{11}l_2^2 + C_{44}l_3^2 + C_{66}l_1^2 - \rho v^2 & (C_{13} + C_{44})l_2l_3 \\ (C_{13} + C_{44})l_1l_3 & (C_{13} + C_{44})l_2l_3 & C_{33}l_3^2 + C_{44}(1 - l_3^2) - \rho v^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

式(2)为关于 v^2 的三次方程, 当材料的弹性性质已知时, 可确定给定方向下 3 种不同模式声波的相速度; 反之, 若测得沿不同方向传播的声波相速度, 可反向求取介质的弹性常数。对于横观各向同性板, 其 5 个弹性常数可由 2 个对称面(1-2 平面和 1-3 平面)的声速确定^[10]。值得注意的是, 1-3 平面内声速与弹性常数间的关系式是高度非线性的, 直接求解十分困难, 需借助有效的非线性优化算法进行数值求解。

超声液浸背反射法是一种有效的测量试样中不同传播方向上声速的方法, 超声液浸背反射实验测量系统如图 2 所示。该方法使用一个超声换能器同

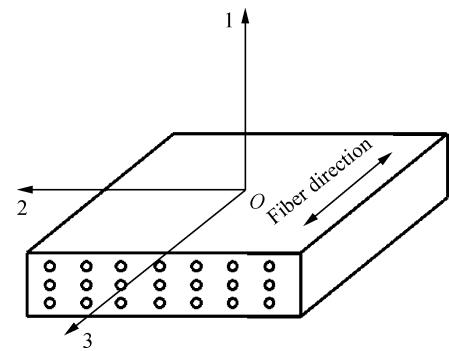


图 1 CFRP 单向板及坐标系

Fig. 1 Unidirectional CFRP plate and coordinated system

式中: $\boldsymbol{\Gamma}_{ik}$ 为 Christoffel 矩阵, $\boldsymbol{\Gamma}_{ik} = \mathbf{C}_{ijkl} l_j l_l$, \mathbf{C}_{ijkl} 为材料的弹性张量, l_j 和 l_l 均为波法线余弦; ρ 为材料密度; v 为声波传播的相速度; $\boldsymbol{\delta}_{ik}$ 为 Kronecker 算符; \mathbf{u}_k 为质点振动矢量。式(1)存在非奇异解的条件是其系数矩阵行列式等于 0, 即

$$\begin{vmatrix} C_{33} + C_{44} & l_1l_3 & \\ (C_{13} + C_{44})l_2l_3 & C_{33}l_3^2 + C_{44}(1 - l_3^2) - \rho v^2 & \\ C_{33}l_3^2 + C_{44}(1 - l_3^2) - \rho v^2 & \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

时发射和接收信号, 在试样的背面放置反射体以反射超声信号, 试样浸没在液体中, 并可绕轴旋转不同角度。以垂直入射时反射体表面的超声回波信号作为参考信号, 由不同角度下超声回波信号与参考信号之间的延时 Δt_{θ_i} 可以计算出超声波在试样内不同方向的传播相速度^[11]:

$$v(\theta_r) = \left[\frac{1}{2} \frac{\Delta t_{\theta_i} - (\Delta t_0 + \Delta t_{\theta_i}) \cos \theta_i}{h v_w} + \frac{\Delta t_{\theta_i} (2\Delta t_0 + \Delta t_{\theta_i})}{4h^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: v_n 为声波垂直入射时试样中的相速度, 由垂直入射时试样表面和底面反射回波信号间的时间差计算得到; Δt_0 为垂直入射时的信号与无试样时信号间的延时; h 为试样的厚度; v_w 为水中声速。在测得声速后, 则可由 Snell 定律计算试样中相应的折射角度 θ_r 。

2 实验材料及方法

以 CFRP 单向板为测试对象, 该试样由 40 层 T700/环氧树脂预浸料经手糊成型工艺制成, 试样厚度为 5.78 mm, 密度为 1.542 kg/m³。测量前利用 SM-J3B-300 型三轴水浸超声 C 扫描系统对试样

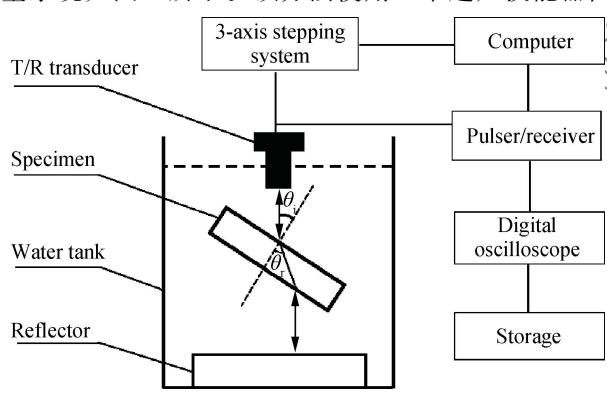


图 2 超声液浸背反射实验测量系统

Fig. 2 Back reflection ultrasonic immersion experimental measurement system

进行了缺陷检测, 所用换能器为 2.25 MHz 水浸聚焦换能器, 步进为 0.2 mm, 测试结果表明试样内部无明显缺陷且材质均匀。

准确测试声速是保证弹性常数测试精度的前提, 为实现试样不同方向上超声信号的准确获取, 设计搭建了图 2 所示的超声液浸背反射实验测量系统。该系统包括用于反射和接收超声波脉冲信号的 GE USIP 40 脉冲发射/接收仪、用于显示和记录超声脉冲信号的 Tektronix DPO 4024B 型数字示波器以及用于调整探头位置和角度的三维步进装置, 其最小步进为 0.1 mm, 回位误差小于 6 μm ; 同时, 借助角度旋转测试装置可实现试样绕旋转轴 $90^\circ \sim 90^\circ$ 转角的精确控制, 最小步进可达 0.05° 。实验中, 1-2 平面和 1-3 平面的入射角度测量范围均为 $0^\circ \sim 55^\circ$ 。选用 Olympus 2.25 MHz 水浸超声换能器, 采用较大的有机玻璃平板(厚度为 10 mm)作为反射体以确保超声信号返回换能器。耦合液体为水, 考虑声速随水温存在一定波动, 实验过程中测量了水中的声速 v_w 为 1 475.6 m/s。

3 结果分析及讨论

3.1 延时测量与声速计算

延时的获取直接决定了声速的测试质量。小的旋转角度步进使延时最小可达 10^{-10} s 量级, 加上波形畸变及噪声干扰, 人为读数往往带有很大误差, 影响测试精度。信号互相关处理的时域波形和相关系数曲线如图 3 所示。以入射角度为 0.9° 的信号为例, 其与 0° 参考信号在时域上的波形差别很小, 难以区分, 如图 3(a)所示。有研究者在超声测距研究中发现, 利用互相关算法可抑制噪声信号的干扰, 获取精确的超声信号延时^[14], 因此尝试采用互相关信号处理技术计算延时 Δt_{g} 。由于垂直入射与斜入射时的超声脉冲信号是频率相同的周期信号, 根据互相关算法的特性, 若 2 个周期同为 T 的信号之间延时为 τ , 则其相关信号的峰值出现在 τ 时刻。2 个不同信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互相关 $R_{xy}(\tau)$ 可表示为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t + \tau) dt \quad (4)$$

利用软件编写互相关算法程序并将入射角度为 0.9° 的信号与 0° 参考信号进行互相关运算, 得到图 3(b)所示的相关系数曲线, 相关系数最大位置所对应的时间即为两信号之间的延时, 由图 3(b)

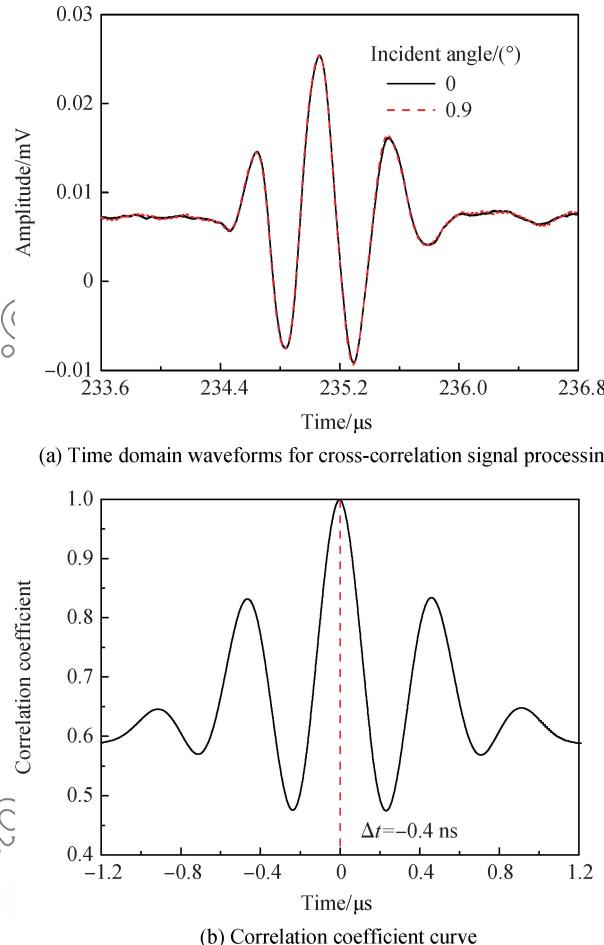


图 3 信号互相关处理的时域波形和相关系数曲线

Fig. 3 Time domain waveforms for cross-correlation signal processing and correlation coefficient curve

可知相关系数最大为 0.999 6, 位置为 -0.4 ns, 实现了小角度旋转条件下的声时差识别。此外, 利用互相关处理同时也实现了超声信号的批量运算, 提高了测试效率。

由式(3)分别计算试样 1-2 平面和 1-3 平面内超声波声速随入射角度的变化, CFRP 单向板 1-2 平面和 1-3 平面内声速随入射角度的变化如图 4 所示。可见, 在 1-2 平面内, 入射角度由 0° 逐渐增加时, 纵波声速保持不变, 约为 2 890.0 m/s; 当增加至第一临界角(约为 28°)时, 出现一些散射数据点, 其分布范围在 $28^\circ \sim 33^\circ$ 之间; 此后, 试样中仅存在横波, 声速变为 1 383.9 m/s, 可以看到横波声速在各角度下也是保持不变的, 表明该平面是各向同性的。而在 1-3 平面内, 入射角度由 0° 变化到第一临界角(约为 6°)时, 准纵波声速由 2 890.0 m/s 增加到 3 020.1 m/s; 在 $6^\circ \sim 9^\circ$ 范围内, 声速数据点散

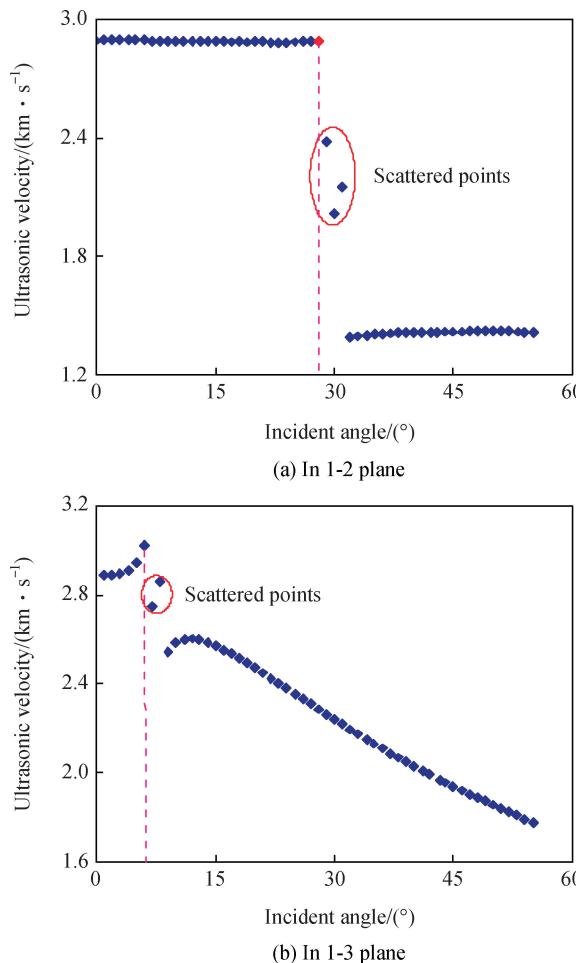


图 4 CFRP 单向板 1-2 平面和 1-3 平面内声速随入射角度的变化

Fig. 4 Variations for ultrasonic velocity versus incident angle of unidirectional CFRP plate in 1-2 plane and 1-3 plane

乱分布;之后,试样中仅存在准横波,其声速随入射角度的增加先增大到 2 603.8 m/s 后逐渐减小,显示出该平面的各向异性。两平面声速测量结果表明试样整体上呈横观各向同性。注意到在 1-2 平面和 1-3 平面内,第一临界角附近区域均存在一些随机分布的数据点,其声速值介于(准)纵波与(准)横波声速之间,其他研究者也发现了类似现象^[10]。其产生原因可能是该角度范围内纵波未完全消失,与横波相互干涉,在反演弹性常数时应将这些点剔除。

3.2 弹性常数反演

由 CFRP 单向板的声速反演弹性常数是一个非线性多参数组合优化问题,保证算法可靠性、避免陷入局部最优是保证弹性常数反演精度的关键。其他研究者先后研究了最小二乘法及遗传算法等,但仍存在易过早收敛、精度不高等问题^[11-13],探索新的反演算法对提高反演准确性和稳定性是十分必

要的。模拟退火算法是一种全局优化算法,具有反演精度高、初值鲁棒性强且通用易实现等优点,即使对于复杂的非线性问题也能有效求得全局最优解,在地震反演^[15]及复合材料层合板频率优化^[16]等诸多问题中得到了应用,笔者尝试将其应用于弹性常数的反演。定义目标函数 F 为理论计算声速与实验测量声速二者平方之差的平方:

$$F = \sum_{i=1}^N \left[(V_i^{\exp}(\theta))^2 - (V_i^{\text{cal}}(\theta))^2 \right]^2 \quad (5)$$

式中: N 为声速测量数据的个数; $V_i^{\exp}(\theta)$ 为实验测量声速; $V_i^{\text{cal}}(\theta)$ 为将尝试解代入 Christoffel 方程计算得到的声速。通过软件编程,利用模拟退火算法搜索使目标函数达到最小值的解即为所求反演结果。经计算,CFRP 单向板的 5 个独立弹性常数 C_{11} 、 C_{13} 、 C_{33} 、 C_{44} 和 C_{66} 分别为 12.88、6.39、126.83、4.85、2.97 GPa。

3.3 弹性常数反演结果验证

由于弹性常数是求解 Christoffel 方程的反问题得到的,反演结果的准确性有待确认。因此结合声学模拟和理论计算进行验证,以对提出的算法及结果进行评价。

利用 CIVA 声学仿真软件对各向异性面的测量过程进行模拟,超声液浸背反射法仿真模型如图 5 所示。将 CFRP 单向板设为均质横观各向同性材料,并赋以 3.2 节中的弹性常数。图 6 为不同入射角度下 CFRP 单向板 CIVA 软件模拟和实验测量的时域波形。CIVA 软件模拟如图 6(a)所示,对应的实验测试也一并在图 6(b)中给出,为便于比较,

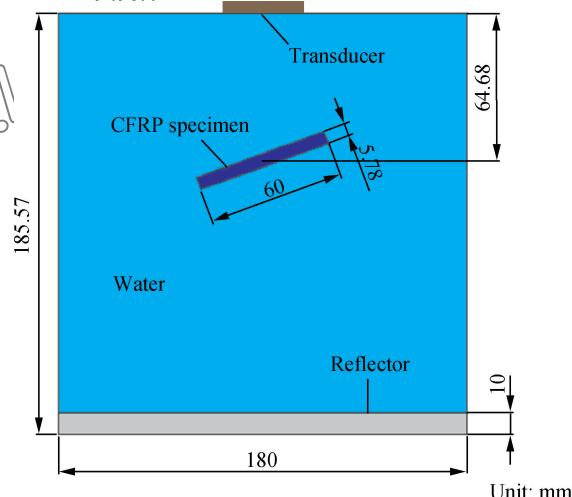


图 5 超声液浸背反射法仿真模型

Fig. 5 Simulation model of back reflection ultrasonic immersion technique

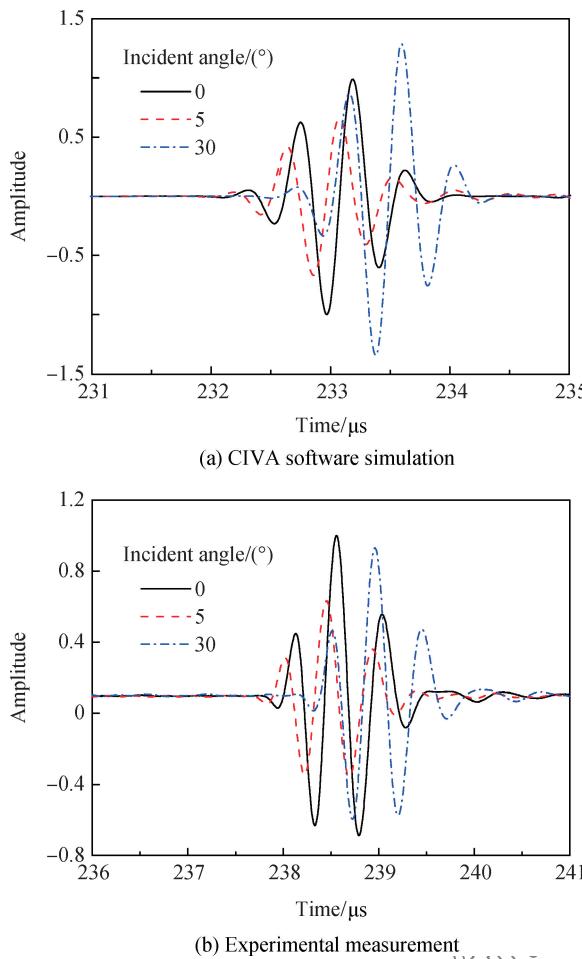


图 6 不同入射角度下 CFRP 单向板 CIVA 软件模拟和实验测量的时域波形

Fig. 6 Time domain waveforms of unidirectional CFRP plates at different incident angles by CIVA software simulation and experimental measurement

将模拟信号和实验信号均除以各自垂直入射信号的最大幅值。比较图 6(a)和图 6(b)可知, 模拟所得延时变化规律和实验测量结果具有很好的一致性, 入射角度为 5°和 30°的超声信号相对于垂直入射信号的偏移方向与实验测量结果均相同。虽然模拟信号与实验信号的幅值变化规律存在差异, 但是对延时信息和声速计算不会产生影响。

表 1 不同声速波动下 CFRP 单向板反演弹性常数误差

Table 1 Errors of inversed elastic constants for unidirectional CFRP plates with different ultrasonic velocity scatters

Ultrasonic velocity scatter/%	C ₃₃		C ₄₄		C ₁₃	
	Mean value/GPa	Error/%	Mean value/GPa	Error/%	Mean value/GPa	Error/%
0	126.83	0	4.85	0	6.39	0
0.33	126.27	0.44	4.85	0	6.36	0.47
1.00	127.11	0.22	4.85	0	6.46	1.10
2.00	124.90	1.52	4.86	0.21	6.44	0.78

进一步将声速的模拟结果、实验测量结果和由 Christoffel 方程理论计算的结果进行比较, CFRP 单向板 1-3 平面内声速随入射角度的变化如图 7 所示。可见, 使用反演得到的弹性常数时, 声速的模拟和理论计算结果均与实验测量结果吻合良好, 3 种情况的声速偏差最大为 6.4 m/s, 与理论曲线比较, 声速测量结果数据波动范围小于 0.33%。

声速的测试精度直接影响弹性常数的反演结果, 必须评价声速测量误差对反演结果的影响程度, 因此统计分析了不同声速测量误差条件下弹性常数的变化情况, 每个条件下分别计算 10 组数据并取平均值。不同声速波动下 CFRP 单向板反演弹性常数误差如表 1 所示。可见, 当声速波动由 0 增加到 2.00% 时, 反演弹性常数误差随之增大; 当声速波动为 0.33% 时, 反演弹性常数误差均在 0.47% 以下。说明基于采用的实验装置、延时计算及声速测量方法和弹性常数反演算法, 能够保证 CFRP 单向板弹性常数的测试精度。

当弹性常数确定后, 可计算沿纤维方向的弹性模量:

$$E_3 = C_{33} - \frac{2C_{13}^2}{C_{11} + C_{12}} \quad (6)$$

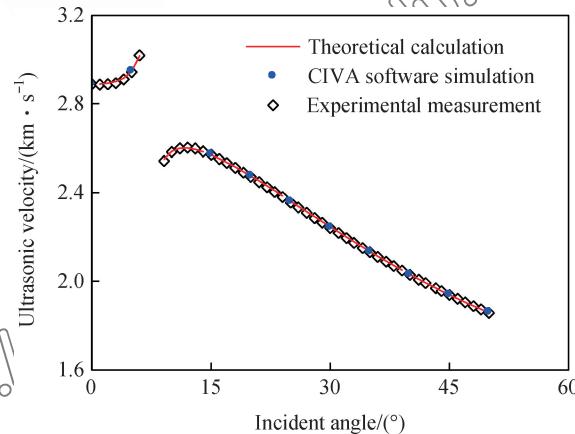


图 7 CFRP 单向板 1-3 平面内声速随入射角度的变化

Fig. 7 Variations for ultrasonic velocity versus incident angle of unidirectional CFRP plate in 1-3 plane

经计算, 其值为 122.7 GPa。按照 GB/T 1447—2005^[17]用 CRIMS-DNS300 型万能电子试验机和 CBY-12 型引伸计对 CFRP 单向板进行力学拉伸试验, 测得的 E_3 为 (126.0 ± 2.5) GPa, 与上述结果偏差为 2.6%, 吻合较好, 说明了超声测试方法的可靠性。此外, 超声方法对其他正交各向异性介质的弹性常数测试也是适用的。

4 结 论

(1) 基于超声液浸背反射法, 借助自行搭建的角度旋转测试装置结合互相关算法实现了延时测量和声速计算, 发现碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) 单向板的 1-2 平面和 1-3 平面声速变化规律不同, 且 1-3 平面内准纵波和准横波声速随入射角度增加而改变, 表现出明显的各向异性。

(2) 引入了基于全局参数优化的模拟退火算法并进行了软件编程, 利用测量的声速数据反演得到了 CFRP 单向板的弹性常数。

(3) 基于 CIVA 声学仿真软件建立了 CFRP 单向板各向异性面的声速测量仿真模型, 并与理论计算和实验测试的结果相对比, 发现三者的声速偏差值小于 6.4 m/s。在此基础上计算了不同声速波动导致的弹性常数偏差, 表明测量的弹性常数误差均在 0.47% 以下, 说明所得弹性常数精度较高。

参考文献:

- [1] ITO J, BIWA S, HAYASHI T, et al. Ultrasonic wave propagation in the corner section of composite laminate structure: Numerical simulations and experiments[J]. Composite Structures, 2015, 123: 78-87.
- [2] BOUHALA L, MAKRADI A, BELOUETTAR S, et al. Modelling of failure in long fibres reinforced composites by X-FEM and cohesive zone model[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 55(9): 352-361.
- [3] 丁珊珊, 罗忠兵, 陈军, 等. 基于数值计算方法的 CFRP 层板二维细观形貌多孔隙超声散射衰减[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 692-698.
- [4] DING S S, LUO Z B, CHEN J, et al. Ultrasonic scattering attenuation of multi-void on 2D micro-morphology in CFRP laminates based on numerical calculation method[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 692-698 (in Chinese).
- [5] 裴俊峰, 邓明晰. 弹性模量变化对超声兰姆波传播特性的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2007, 23(1): 96-101.
- [6] PEI J F, DENG M X. Influences of elastic modulus' change of sheet on the properties of lamb wave propagation[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2007, 23(1): 96-101 (in Chinese).
- [7] 张文雍. 管道材料物性变化对超声导波传播特性的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [8] ZHANG W Y. Effects of the change of material properties on propagation characteristics of ultrasonic guide waves along the pipe[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010 (in Chinese).
- [9] CHIMENTI D. Physical ultrasonics of composites[M]. Oxford: Oxford University Press, 2011: 81-136.
- [10] MARKHAM M F. Measurement of the elastic constants of fibre composites by ultrasonics[J]. Composites, 1970, 1(2): 145-149.
- [11] ADAMOWSKI J C, BUOCHI F, HIGUTI R T. Ultrasonic material characterization using large-aperture PVDF receivers [J]. Ultrasonics, 2010, 50(2): 110-115.
- [12] 周正干, 高翌飞, 吕炎, 等. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料弹性常数测量[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(2): 162-165.
- [13] ZHOU Z G, GAO Y F, LV Y, et al. Elastic constant matrix measurement of SiC_p reinforced aluminum metal matrix composites[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 35(2): 162-165 (in Chinese).
- [14] CASTELLANO A, FOTI P, FRADDOSSIQ A, et al. Mechanical characterization of CFRP composites by ultrasonic immersion tests: Experimental and numerical approaches[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 66(4): 299-310.
- [15] CHU Y C, ROKHLINSI. Stability of determination of composite moduli from velocity data in planes of symmetry for weak and strong anisotropies[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1994, 95(1): 213-225.
- [16] VISHNUvardhan J, KRISHNAMURTHY C V, BALASUBRAMANIAM K. Genetic algorithm reconstruction of orthotropic composite plate elastic constants from a single non-symmetric plane ultrasonic velocity data[J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38(2): 216-227.
- [17] PUTHILLATH P, KRISHNAMURTHY C V, BALASUBRAMANIAM K. Hybrid inversion of elastic moduli of composite plates from ultrasonic transmission spectra using PVDF plane wave sensor[J]. Composites Part B: Engineering, 2010, 41(1): 8-16.
- [18] 彭映成, 钱海, 黎小毛, 等. 基于时间互相关的超声测距信号获取方法[J]. 仪表技术与传感器, 2014, 35(6): 126-127.
- [19] PENG Y C, QIAN H, LI X M, et al. Method acquiring ultrasonic distance measuring signal based on time cross-correlation algorithm[J]. Instrument Technique & Sensor, 2014, 35(6): 126-127 (in Chinese).
- [20] 朱卫星, 张春晓, 张文博, 等. 基于模拟退火算法的地震资

- 料谱反演技术[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(3): 495-501.
- ZHU W X, ZHANG C X, ZHANG W B, et al. Seismic spectral inversion based on simulated annealing[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(3): 495-501 (in Chinese).
- [16] 孙士平, 张卫红. 基于改进模拟退火算法的复合材料层合板频率优化[J]. 复合材料学报, 2015, 32(3): 902-910.
- SUN S P, ZHANG W H. Frequency optimization of composite laminates using an improved simulated annealing[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(3): 902-910 (in Chinese).
- [17] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. 纤维增强塑料拉伸性能试验方法: GB/T 1447—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- National Technical Committee on Fiber Reinforced Plastic of Standardization Administration of China. Fiber reinforced plastics composites determination of tensile properties: GB/T 1447—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005 (in Chinese).

Improve methods for elastic constants ultrasonic characterization accuracy of carbon fiber reinforced plastic

SU Huimin, LUO Zhongbing, CAO Huanqing, ZHOU Bokun, LIN Li*

(Non-destructive Testing & Evaluation Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China)

Abstract: In order to improve elastic constants ultrasonic characterization accuracy for unidirectional carbon fiber reinforced plastic (CFRP) plates, experimental measurement and numerical simulation were conducted based on back reflection ultrasonic immersion technique. A single-axis rotation testing setup was developed firstly, and the delay time measurements and ultrasonic velocity calculations at different angles were realized by combining cross-correlation signal processing method. Then, the five independent elastic constants were obtained by the inversion of ultrasonic velocity data using simulated annealing optimization algorithm. Finally, the experimental measurement results were verified by theoretical calculation and CIVA software simulation. The results indicate that the ultrasonic velocities of quasi-longitudinal wave and quasi-transverse wave varied with incident angle in 1-3 plane, which is observably distinct from that of 1-2 plane, thus shows that the material is transversely isotropic. The independent elastic constants are 12.88, 6.39, 126.89, 4.85, 2.97 GPa, respectively. The deviations for ultrasonic velocities of theoretical calculation, CIVA software simulation and experimental measurement results are below 6.4 m/s, the fluctuation of experimental measurement data is below 0.33%, and the corresponding errors of elastic constants are below 0.47%. The methods concerned are also valid for the testing of elastic constants for other orthotropic media.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic; elastic constants; nondestructive; ultrasonic; characterization accuracy