基于临界折射纵波法的 CFRP 应力检测

王　伟　　邓　亚　　张宇民　　周玉锋　　陈栋康康
（哈尔滨工业大学特种环境复合材料技术国防科技重点实验室，哈尔滨　150080）

文　摘　研究了不同纤维方向与应力方向对复合材料声弹性关系的影响。为了在材料内部激励临界折射纵波，本文根据斯涅耳定律设计了超声入射楔块，并搭建了声时差检测系统。并使用搭建的系统分别测量了0°、45°单向铺设的两种试样在0°、45°和90°方向的声时差变化，得到了不同加载方向和纤维方向组合情况下，由 CFRP 材料内部应力与声时差表征的声弹性关系。

关键词　临界折射纵波，CFRP 复合材料，声弹性关系，斯涅耳定律
中图分类号：TB332　　DOI：10.12044/j.issn.1007-2330.2018.04.013

Stress Measurement in CFRP Composites Using Critically Refracted Longitudinal Waves

WANG Wei　　DENG Ya　　ZHANG Yumin　　ZHOU Yufeng　　CHEN Dongkangkang
（Science and Technology on Advanced Composites in Special Environments Laboratory, Harbin　150080）

Abstract　The acoustoelastic relations in different fiber and loading directions were studied. With the aim of exciting LCR waves in the material, an incidence wedge was designed according to the snell's law. In addition, a system for measuring the time of fight (TOF) was set up. The system was used to measure the TOF variations along 0°, 45° and 90° directions of 0° and 45° specimens of CFRP composites. As results, the acoustoelastic relations expressed by internal stress and TOF in different fiber and loading directions were obtained.

Key words　Critically refracted longitudinal wave, CFRP composite, Acoustoelastic relation, Snell's law

0　引言

复合材料的失效在很大程度上与其内部残余应力有关。残余应力作为一种材料内部的自平衡应力，其量级通常是不可忽视的。复合材料内部残余应力的测量对有效的评估材料性能具有重要意义，这些性能包括基体裂纹、屈服强度以及结构外形稳定性等。因此，为了避免对材料失效的盲目设计，在设计阶段就要充分考虑残余应力的影响。

应力检测技术主要分为有损和无损两大类[1]。有损检测方法又称为机械方法，主要是通过机械的手段释放被测材料局部的应力，通过应变片等方法测量应力释放前后的应变变化，利用弹性力学原理即可得到释放的应力值；无损检测方法又称为物理方法，主要是通过确定一些物理量与应力之间的联系，达到在不损坏材料的基础上检测残余应力的目的。主要的无损方法有 X 射线衍射法，拉曼光谱法和超声波法。其中超声波法凭借其成本低、简单易行、适用范围广等优点，在过去几十年的广泛发展中展现了巨大的潜力。

一般说来，现行的超声波法主要有横波双折射法、表面波法以及临界折射纵波（LCR）法，其中 LCR 法对应力最为敏感[3]。对于 LCR 法在金属材料中的应用，大量的学者进行了实验研究。JOSEPH 等人[4]检测了低碳钢焊接头的残余应力分布。SADEGHI 等[5]研究了铝板沿厚度方向的焊接残余应力分布。另外，Javadi 等分别检测了不锈钢板次表面应力[6]和焊接管道不同厚度的环向残余应力[7]。目前，LCR 法在复合材料中的应用比较少见。来自巴西的 SANTOS 等人[8]初步说明了 LCR 法在碳纤维增强树脂基复合材料（CFRP）中的可行性，并实验研究了温度对检测结果的影响。

收稿日期：2017-09-25
基金项目：国家重点基础研究发展计划（973 子课题：2014CB046505）
第一作者简介：王伟，1987 年出生，博士研究生，从事复合材料残余应力无损检测工作。E-mail：wangweihit2013@163.com

本文主要的研究目的是为了说明临界折射纵波法对 CFRP 复合材料的可行性,实验研究声时差在不同纤维方向和不同加载方向上的变化规律。为了在 CFRP 材料不同方向激发 LCR 波,本文根据斯涅耳定律分别设计了适用于沿纤维 0°、45°和 90°方向的超声入射楔块。使用这些楔块,本文测量了 CFRP 单向拉伸式样沿加载方向 0°、45°和 90°方向的声时差数据,并分析讨论了变化规律和原因。

1 理论基础

临界折射纵波法主要基于应力与 LCR 波间的物理关系。20 世纪 50 年代,HUGHES 和 KELLY[9] 将这种关系描述为声弹性效应,并为超声应力检测技术提供了理论基础。根据该理论,平行和垂直于加载方向的纵波速度与应力的关系分别由以下表达式表示[3]:

$$\rho_0 v_{111}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu}\left[\frac{\lambda + \mu}{\mu}(4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2l\right] \tag{1}$$

$$\rho_0 v_{113}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu}\left[2l - \frac{2\lambda}{\mu}(\lambda + 2\mu + m)\right] \tag{2}$$

式中,v_{111}和 v_{113}分别表示平行和垂直于应力方向的纵波;ρ_0是固体变形前的密度;σ 为材料所受单向应力(拉伸应力为正,压缩应力为负);λ 和 μ 是二阶弹性常数;l 和 m 是三阶弹性常数。上两式给出了各向同性材料中的超声应力关系,如果被测材料的弹性常数已知,那么这个关系也就明确了。但是对于各向异性复合材料而言,这些弹性常数往往很难确定。另外由式(1)(2)可知,各向同性材料的内部应力会引起纵波速度的各向异性。然而,复合材料自身的各向异性也会引起纵波的各向异性,因此复合材料中超声纵波速度的变化是材料自身各向异性和所受应力叠加影响的结果。

直接测量纵波速度会使测量过程更加复杂,同时增加测量误差。当激发探头与接收探头间的距离固定不变,可以将声速的变化变换为声时差:

$$T = \Delta t = -(L/v^2)\Delta v \tag{3}$$

式中,L 为 LCR 波在材料内部传播的路程,本文中为定值(L=20 mm)。则式(1)(2)可以转化为如下简单关系:

$$T = K\Delta\sigma \tag{4}$$

上式表示在单向应力状态下,LCR 波的传播声时差 T 与应力变化成线性关系。线性系数 K 为声弹性系数。由式(4)可知,只要确定了待测材料在无应力状态下的传播时间,则可根据声弹性系数计算材料所受应力。

为了方便地在被测材料内部激发超声纵波,本文选择纵波斜入射进去被测材料,根据斯涅耳定律,当入射角达到第一临界折射角时,折射纵波会沿材料的次表面传播,这种折射波称为临界折射(LCR)纵波。第一临界折射角可由下式计算得到:

$$\alpha_{cr} = \arcsin(v_1/v_2) \tag{5}$$

式中,v_1和 v_2分别为楔块材料和被测材料的纵波声速。为了确定不同材料的入射临界角,既要提前测量材料的声速值,又要选定合适的楔块材料。

2 实验设计

2.1 CFRP 复合材料声速测量及试样准备

本文选用的碳纤维树脂基复合材料为单向铺层层合板,是一种典型的正交各向异性材料,其详细信息列于表 1。由于 CFRP 复合材料中超声波沿纤维不同方向的传播速度有很大差异,因此超声楔块要根据不同的测试方向进行相应的设计。本文分别沿碳纤维 0°、45°和 90°方向加工尺寸为 10 mm×40 mm×3 mm 的条形试样,用于测量 CFRP 复合材料的纵波声速。

表 1 试验所用 CFRP 复合材料详细信息

Tab.1 The characteristic of the CFRP composite used in this paper

碳纤维	树脂	层合板密度 /g·cm^{-3}	纤维体积分数%	单层纤维厚度/mm	铺层数
T700SC-12K-50C	BA9916	1.57	67	0.125	24

另外,为了研究不同加载方向和不同纤维方向上的声弹性关系,本文分别沿纤维 0°和 45°方向加工制备了单向拉伸试样,试样尺寸为 40 mm×300 mm×3 mm。然后分别检测与加载方向成 0°、45°和 90°角方向的声时差。值得注意的是,两种单向拉伸试样与声速测量中所述的条形试样均取自同一块 CFRP 层合板,这样避免了由材料制备过程引起的材料性能的差异。

2.2 声速测量及超声楔块的设计

超声楔块的作用是提供固定的入射角使得超声探头能够在被测材料内激发 LCR 波。设计超声楔块前,首先要明确被测材料不同方向的声速值。本文使用“一发一收”两个超声纵波探头分别测量这三个角度纵波的传播速度。本文设计了相应的滑轨和夹具,用来保持收发探头与试样的紧密接触,声速测量装置如图 1 所示。

每个角度的条形试样各加工五件进行声速测量,以保证测量的重复性及准确性。由表 2 可明显看出,纵波沿纤维方向传播速最快,大约是垂直于纤维方向的三倍。根据斯涅耳定律,选择声速较低(1 422m/s)

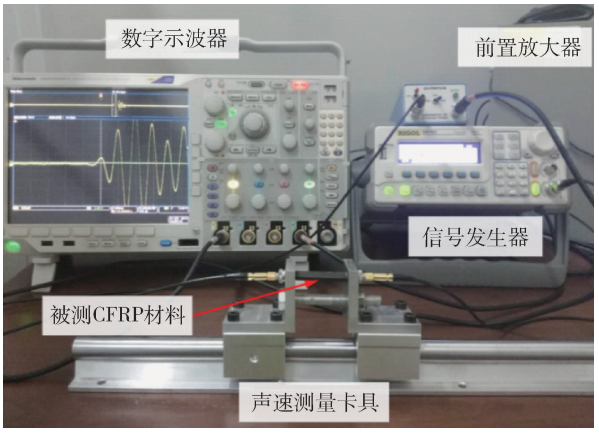


图 1　CFRP 材料声速测量装置

Fig.1　Device of velocity measurement for CFRP composite

的聚四氟乙烯作为楔块材料，并由公式(5)分别计算对应的第一临界角。研究表明，当入射角比第一临界角大 1°左右时，LCR 波的振幅时最大的[10]。测量得到的声速、入射角分别列于表 2。

表 2　CFRP 材料声速测量结果

Tab.2　Results of measured velocity for CFRP composite

测量角度/(°)	声速/m·s^{-1}	λ 射角/(°)
0	9259	10
45	6503	14
90	2890	30

另外，为了同时检测拉伸试样三个方向的声时差，并降低由接触面耦合层滑动、角度及收发探头间距变化引起的测量误差，本文设计了如图 2 所示正八边形超声楔块。该楔块根据表 2 中不同测量角度预制相应的入射角斜面，确保在材料内部该检测方向激发 LCR 波。超声探头与超声楔块间通过螺纹连接，探头和聚四氟乙烯楔块间预留空腔，并填充耦合剂。为了保持楔块与被测材料间紧密接触，楔块中部镶嵌了一组钕铁硼磁铁。

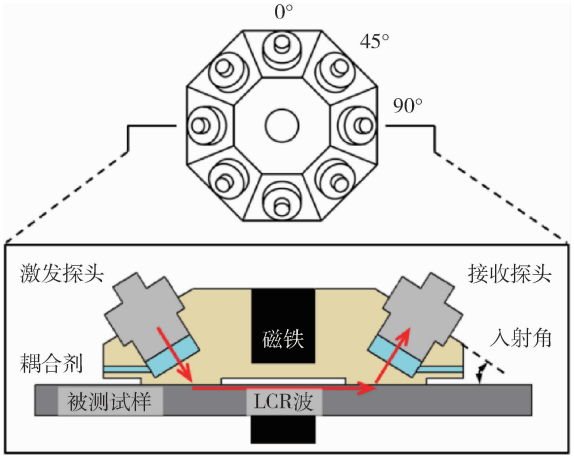


图 2　三向(0°,45°,90°)超声楔块示意图

Fig.2　Schematic of incidence wedge used for 0°, 45° and 90° directions

2.3　声时差检测系统

为了检测 CFRP 材料沿纤维三个不同方向声弹性关系，本文搭建了如图 3 所示实验系统。本文中用于输出超声信号的是 RIGOL 公司的 DG1022 信号发生器，它在输出脉冲正弦波的同时也输出同步信号，用于触发示波器。使用上节中设计的超声楔块，三路脉冲正弦波信号依次激励三个激发探头，产生的超声纵波以第一临界角入射进入聚四氟乙烯楔块，并在楔块与被测试样的接触面处发生折射。另外，本文选用 Tektronix 公司的 MSO4104B 数字示波器来采集接收到的信号，该型号的示波器具有最大 2.5 GS/s 的采样频率，足以满足检测精度的需求。同时为了保证接收信号的强度，本文选用 OLYMPUS 的 5660B 前置放大器对接收信号进行放大，增益选择为 60 dB。示波器采集到的信号经计算机数据处理后即可得到由应力引起的声时差。本文中使用的探头为频率2.5 MHz 的压电陶瓷换能器，压电晶片直径为 6 mm。

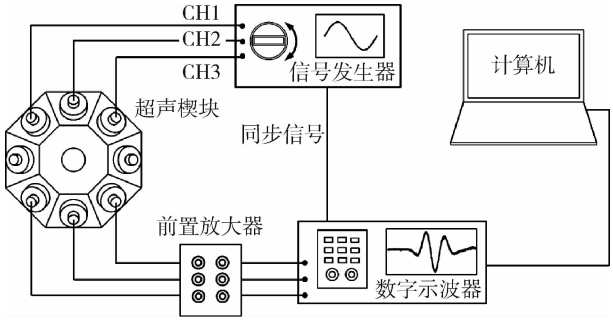


图 3　三向(0°。45°、90°)声时差测试系统示意图

Fig.3　Schematic of measurement system for TOFs in 0°, 45° and 90° directions

综上，被测 CFRP 材料的声速已经确定，并根据声速设计了相应的超声楔块，进一步搭建了声时差检测系统。之后本文可进行单向拉伸实验，研究加载角度与纤维角度对声弹性关系的影响。

3　结果与讨论

根据斯涅耳定律，临界折射纵波平行于试样表面传播，最先被接收探头接收。图 4 即为本文利用示波器接收到的来自信号发生器的同步信号，以及接收探头接收到的 LCR 波信号。

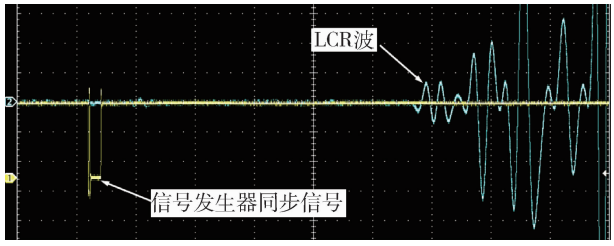


图 4　临界折射纵波特征

Fig.4　Characteristic of critically refracted longitudinal wave

本文为了表征材料内部应力引起的 LCR 波的传播时间变化，利用单轴力学试验机对试样进行等应力间隔阶梯加载。由于单向铺层 CFRP 复合材料各个方向强度差异很大，0°拉伸试样以 30 MPa 为间隔加载，45°试样 5 MPa 为间隔。每个加载阶段保持 20 s 以便进行声时差测量。本文分别进行了 0°和 45°试样的拉伸实验，并同时记录下与加载方向成 0°、45°和 90°角方向的声时差变化。图 5 分别绘制了沿纤维 0°和 45°加载时，与加载方向成 0°、45°和 90°角方向的声时差-应力曲线。图中曲线的斜率绝对值的大小可表示声时差对应力的敏感程度。

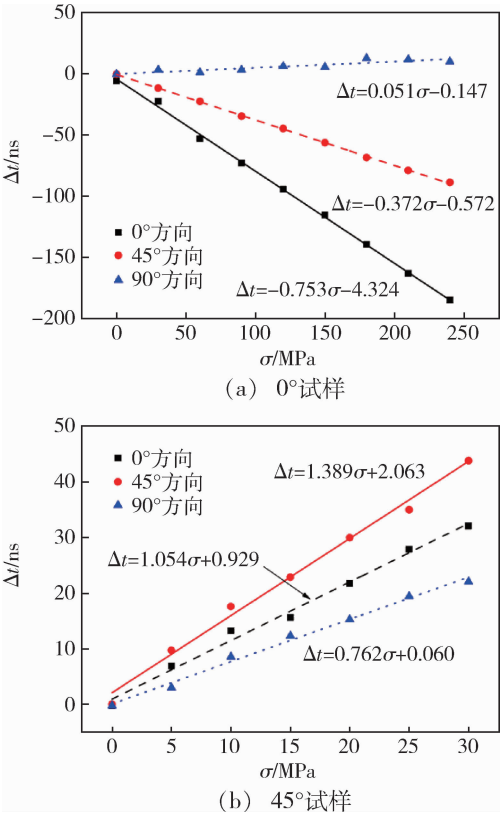


图 5 三个角度方向声时差-应力关系

Fig.5 Curves of TOFs versus stress in three directions

根据图 5 可知，沿纤维 0°方向加载时，加载方向（也是纤维方向）的声时差对应力最为敏感，垂直于加载方向最不敏感。沿纤维 45°方向加载时，与加载方向成 45°方向（纤维方向）的声时差对应力最为敏感。另外与加载方向成 0°和 90°的两个方向是与纤维均成 45°的对称方向，然而由于应力的影响，沿着加载方向的 0°方向比 90°方向对应力更为敏感。这说明相同应力状态下，沿纤维方向的声时差对应力最为敏感，与纤维成相同角度下，更靠近应力方向的声时差对应力最为敏感。

4 结论

本文为了表征应力方向和纤维方向对 CFRP 内部声弹性关系的影响，进行了单向铺层层合板的拉伸检测实验。本文根据斯涅耳定律分别计算了 0°、45°和 90°方向的第一临界角，以便在被测材料不同纤维方向激励 LCR 波。之后根据声速数据设计了正八边形超声楔块，并搭建了声时差检测系统。利用搭建的系统分别检测了 0°和 45°拉伸试样与加载方向成 0°、45°和 90°方向的声时差变化得到如下结论：

（1）纵波沿纤维方向传播速最快，大约是垂直于纤维方向的三倍；

（2）实验结果表明相同应力状态下，沿纤维方向的声时差对应力最为敏感；

（3）与纤维成相同角度下，更靠近应力方向的声时差对应力更敏感。

这说明了在纤维增强复合材料中，除了应力作用外，纤维方向同样是超声检测中不可忽视的影响因素。这一结论为纤维增强类复合材料的内部应力超声检测提出了有益的建议。

参考文献

[1] SHOKRIEH M M. Residual stresses in composite materials[M]. Woodhead, 2014.

[2] ROSSINI N S, DASSISTI M, BENYOUNIS K Y, et al. Methods of measuring residual stresses in components[J]. Mater. Des, 2012, 35: 572-588.

[3] SONG W, XU C, PAN Q, et al. Nondestructive testing and characterization of residual stress field using an ultrasonic method[J]. Chinese J. Mech. Eng, 2016, 29(2): 365-371.

[4] JOSEPH A, PALANICHAMY P, JAYAKUMAR T. Evaluation of residual stresses in carbon steel weld joints by ultrasonic lcr wave Technique[J]. J. Nondestruct. Eval, 2015, 34(1): 266.

[5] SADEGHIS, NAJAFABADI M A, JAVADI Y, et al. Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates[J]. Mater. Des, 2013, 52: 870-880.

[6] JAVADI Y. Investigation of clamping effect on the welding residual Stress and deformation of monel Plates by using the ultrasonic Stress measurement and finite element method[J]. J. Press. Vessel Technol, 2015, 137(1): 011501.

[7] JAVADIY, KROLCZYK G M, HLOCH S. Evaluation of hoop residual stress variations in the thickness of dissimilar welded pipes by using the LCR ultrasonic waves[J]. Teh. Vjesn, 2016, 23(2): 329-335.

[8] SANTOSA A, AMBIEL L B, GARCIA R H, et al. Stress analysis in carbon/epoxy composites using Lcr waves[J]. J. Compos. Mater, 2014, 48(27): 3425-3434.

[9] HUGHESD S, KELLY J L. Second-order elastic deformation of solids[J]. Phys. Rev, 1953, 92 (5): 1145-1149.

[10] CHAKIS, KE W, DEMOUVEAU H. Numerical and experimental analysis of the critically refracted longitudinal beam[J]. Ultrasonics, 2013, 53 (1): 65-69.