

基于沃拉斯顿棱镜的错位散斑干涉复合材料无损检测仪

于霄翊, 曾启林, 徐宋通, 熊显名, 张文涛, 杜浩, 石冯睿
(桂林电子科技大学 光电工程学院, 桂林 541004)

摘要: 激光错位散斑干涉技术具有全场非接触、高精度和高灵敏度等优点, 被广泛应用于复合材料的无损检测领域。针对实际工程应用中的复合材料缺陷检测, 提出了一种结构紧凑、抗干扰能力强的基于沃拉斯顿棱镜的错位散斑干涉无损检测仪, 实现了对缺陷的实时动态检测。使用该检测仪对不同材料复合材料中的缺陷进行检测, 检出率可达 97%, 可检测的最小缺陷尺寸为 $\phi 2$ mm。

关键词: 错位散斑干涉; 复合材料; 沃拉斯顿棱镜; 动态检测

中图分类号: TG155.28; TB96; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2024)01-0077-05

A shearography nondestructive testing instrument for composite based on Wollaston prism

YU Xiaoyi, ZENG Qilin, XU Songtong, XIONG Xianming, ZHANG Wentao, DU Hao, SHI Fengrui

(School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Shearography technique has the advantages of full-field noncontact, high precision and high sensitivity, and is widely used in the field of nondestructive detection of composites. For the practical engineering application of composite defect detection, a shearography nondestructive instrument based on a Wollaston prism with compact structure and strong anti-interference ability was proposed, so as to realize real-time dynamic defect detection. The system was used to test the different types of composite materials. It achieved a detection rate of 97% and can detect defects as small as 2 mm.

Key words: shearography; composite; Wollaston prism; dynamic measurement

激光错位散斑技术是光学测量技术的分支, 具有非接触、高精度等特点, 在无损检测领域应用广泛^[1]。复合材料具有强度高、质量轻和抗疲劳性能好等优点, 被广泛应用于航空航天、汽车工业、化工、机械制造和医学等领域^[2]。在复合材料加工过程中会出现气泡、裂纹和层间分离等缺陷^[3], 这些缺陷会

影响材料的力学性能和使用寿命, 严重时不仅会造成巨大经济损失, 还会影响到人身安全。因此需要使用无损检测技术对复合材料进行检测和质量评价。

目前常用的复合材料无损检测方法有超声检测^[4]、光学检测^[5]、射线检测^[6]和涡流检测^[7]等。其中光学检测因具有快速、非接触、无损伤和高分辨率等优点而被广泛应用。光学检测中的数字错位散斑干涉技术通过计算物体变形前后的散斑图中的相位来分析被测物的变形梯度, 从而能更容易地检测出缺陷, 也更符合工业生产的实际需求^[8-9]。

FENG 等^[10]利用沃拉斯顿棱镜搭建了错位散斑干涉装置, 通过傅里叶变换提取相位信息, 验证了错位量和偏振状态对条纹质量的影响。张志刚等提

收稿日期: 2023-05-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0605502); 国家科技重大专项课题(2017ZX02101007-003); 国家自然科学基金(61965005); 国家自然科学基金(62205076); 广西自然科学基金(2019GXNSFDA185010); 广西重点研发计划项目(AB22035047); 上海市在线检测与控制技术重点实验室开放基金项目(ZX2021104)

作者简介: 于霄翊(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光剪切散斑无损检测

通信作者: 曾启林, qilin.zeng@guet.edu.cn

出了基于微偏振片阵列的错位干涉系统。YAN 等^[11]将微偏振片阵列技术引入迈克尔逊光路中,得到了较高的条纹对比度。激光错位干涉技术在复合材料的脱黏、分层、冲击等类型缺陷的检测上有显著优势。李慧娟等^[12]对脱黏缺陷进行检测,检测精度在 10% 以内。徐子鹏等^[13]对含有冲击损伤的碳纤维层压板进行检测试验,验证了激光错位散斑干涉技术的准确性,并且验证了错位量大小对缺陷检测准确性的影响。郭媛等^[14]使用双波长激光错位散斑干涉技术对复合材料进行检测,解决了变形条纹过于密集导致的欠采样问题。程文等使用激光错位散斑技术对飞机复合材料进行检测并取得了较好的结果。李姝欣等^[15]利用激光错位散斑干涉技术对碳纤维层压板的缺陷进行检测,并与 X 光检测技术及超声 C 扫描技术进行对比,证明了激光错位干涉技术的有效性。

目前错位干涉技术在国内外的工程材料无损检测领域有着广泛的应用需求。例如德国 Dantec Dynamics 公司研发的 Flaw Hunter, Flaw Explorer 干涉仪;德国 Steinbichler 公司研发生产的 INTACT 系列干涉仪;美国 Laser Technology Inc 研制的 LTI 便携式干涉仪。国内有广州华工百川科技股份有限公司研发的 BTJSLNDT 无损检测系统;上海实博实业有限公司开发的 QSG-1 干涉仪;苏州卓立特光电仪器公司开发的 TS-SS-P 干涉仪。

文章介绍了基于沃拉斯顿棱镜的错位散斑干涉系统的光路结构和相位提取原理。将传统沃拉斯顿棱镜与微偏振片阵列相结合,改变了传统的相移方式。为了弥补国内尚未有便携式错位散斑干涉仪的空白,自主设计了一套结构紧凑、抗干扰能力强的基于沃拉斯顿棱镜的错位散斑干涉仪。利用自主设计的错位散斑干涉仪对碳纤维层压复合板和聚氨酯橡胶复合板中的缺陷进行检测,分析干涉仪对两种复合材料缺陷的定量检测准确性及所能达到的检测精度,结果表明该干涉仪可以应用在复合材料的无损检测中。

1 测量原理

文章将沃拉斯顿棱镜与微偏振片阵列相结合,形成了一种结构紧凑、抗干扰能力强的光路系统。该光路系统的原理如图 1 所示,系统主要由激光器、扩束系统、沃拉斯顿棱镜(W₁)、四分之一波片(P₁)、成像镜头(P₂)和带有微偏振片阵列的 CCD 相机组成。

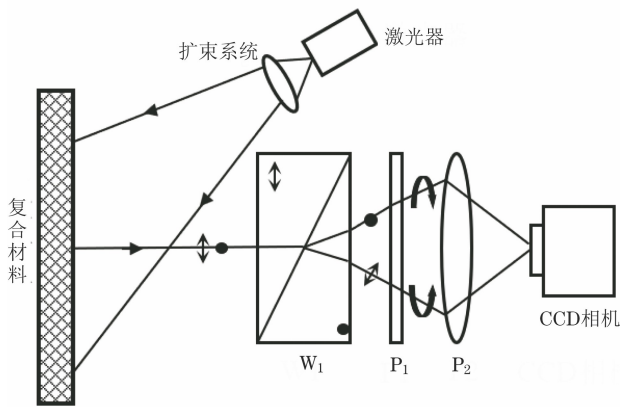


图 1 基于沃拉斯顿棱镜的错位散斑干涉光路原理

激光器发出的激光经过扩束系统照射至被测复合材料表面,被测复合材料漫反射的光经沃拉斯顿棱镜后被分为两束互相错位重叠的正交线偏振光,这两束正交偏振光的琼斯矩阵可表示为

$$\mathbf{E}_x = A_x e^{ik\mathbf{W}(x+dx, y+dy)} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{circ}(\sqrt{(x+dx)^2 + (y+dy)^2}/R) \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_y = A_y e^{ik\mathbf{W}(x, y)} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{circ}((x+y)^2/R) \quad (2)$$

式中:dx, dy 为错位矢量 $\mathbf{d} = x_o \cdot dx + y_o \cdot dy$ 的两个分量; $k = 2\pi/\lambda$ (λ 为波长); circ 为圆域函数。

设系统在 x 方向进行错位,则 dy=0, 错位矢量 $\mathbf{d} = x_o \cdot dx$ 。

两束正交的线偏振光经过四分之一波片后成为两束旋向相反的圆偏振光。四分之一波片的琼斯矩阵表示为

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

经过四分之一波片后,两束圆偏振光 \mathbf{E}'_x 和 \mathbf{E}'_y 分别表示为

$$\mathbf{E}'_x = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{E}_x = \frac{1}{\sqrt{2}} A_x e^{ik\mathbf{W}(x+dx, y)} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{E}'_y = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{E}_y = \frac{1}{\sqrt{2}} A_y e^{ik\mathbf{W}(x, y)} \begin{bmatrix} -i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

两束圆偏振光再经过微偏振片阵列被 CCD 相机感光单元同时刻采集。微偏振片阵列由公式(6)表示,经过微偏振片阵列的两束光 E''_x 和 E''_y 由公式(7),(8)表示。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{E}''_x = \mathbf{P} \cdot \mathbf{E}'_x = \frac{1}{\sqrt{2}} A_x e^{ik\mathbf{W}(x+dx, y)-\theta} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{E}_y'' = \mathbf{P} \cdot \mathbf{E}_y' = \frac{-i}{\sqrt{2}} A_y e^{ikW(x,y)+\theta} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: θ 表示微偏振片阵列的投射方向与纸面所在平面的夹角。

且有

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_x'' + \mathbf{E}_y'' = \begin{cases} \mathbf{E}_o & \mathbf{P}(x,y) \in \Sigma \\ \mathbf{E}_x'' & \mathbf{P}(x,y) \in \Sigma_1 \\ \mathbf{E}_y'' & \mathbf{P}(x,y) \in \Sigma_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{P}(x,y)$ 为圆域中的场点; Σ 为两圆域的重叠部分, 是系统发生干涉的区域; Σ_1 和 Σ_2 为不重叠区域, 在此区域不发生干涉现象, 如图 2 所示。

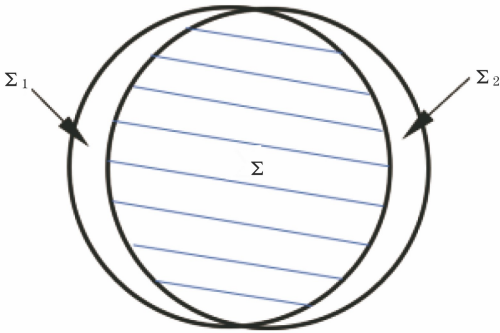


图 2 错位像重叠示意

\mathbf{E}_o 为重叠区域光振幅, 其表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_o &= \mathbf{E}_x'' + \mathbf{E}_y'' \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} [A_x e^{i(W(x+d,y)-\theta)} - iA_y e^{i(W(x,y)+\theta)}] \end{aligned} \quad (10)$$

令 $\Delta W = W(x+d,y) - W(x,y)$, 则重叠区域的光场强度为

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2} A_x^2 + \frac{1}{2} A_y^2 + A_x A_y \sin(k\Delta W + 2\theta) \\ &= \frac{1}{2} I_x + \frac{1}{2} I_y + \sqrt{I_x I_y} \sin(k\Delta W + 2\theta) \end{aligned} \quad (11)$$

可以看出, 在重叠区域的两束相互正交的线偏光形成干涉, 且干涉条纹的光强与 2θ 有关。文章采用的 CCD 相机上的微偏振片阵列中, 一组 4 个 (2×2) 微偏振片组成一个单元, 每个单元透偏振方向分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$, 如图 3 所示。微偏振片阵列与 CCD 相机连接, 每个微偏振片对应相机的单个像素。线性微偏振片对左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的干涉会导致相移, 相移大小是线偏振片的透偏振角的两倍, 因此光束在透过微偏振片阵列后加入了 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 的相移。所以带有微偏振片阵列的 CCD 相机可在同一时刻采集一幅包含 4 个相位的散斑图。

令 $\varphi = k\Delta W$, 则对应光场光强为

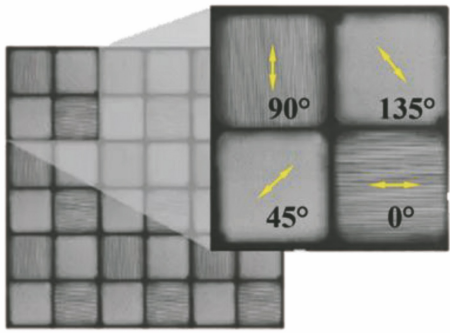


图 3 微偏振片阵列示意

$$\begin{aligned} I_i &= \frac{1}{2} I_x + \frac{1}{2} I_y + \sqrt{I_x I_y} \sin \left[\varphi + \frac{\pi}{2} (i-1) \right] \\ (i &= 1, 2, 3, 4) \end{aligned} \quad (12)$$

通过热加载等方式使物体产生微形变, 对被测物体加载后的散斑图进行采集, 加载后对应光强分布为

$$\begin{aligned} I'_i &= \frac{1}{2} I'_x + \frac{1}{2} I'_y + \sqrt{I'_x I'_y} \sin \left[(\varphi + \Delta\varphi) + \frac{\pi}{2} (i-1) \right] \\ (i &= 1, 2, 3, 4) \end{aligned} \quad (13)$$

式中: I'_x, I'_y 为

分别提取加载前和加载后采集的散斑图对应 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 的像素, 组成 8 幅相位不同的散斑图, 如图 4 所示。加载前后的 I_x, I_y 和 I'_x, I'_y 差异很小, 经过 8 图四步算法可得到加载前后的相位变化量 $\Delta\varphi$, 即相位图表示为

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{(I_1 - I_3)(I'_2 - I'_4) - (I_2 - I_4)(I'_1 - I'_3)}{(I_1 - I_3)(I'_1 - I'_3) + (I_2 - I_4)(I'_2 - I'_4)} \quad (14)$$

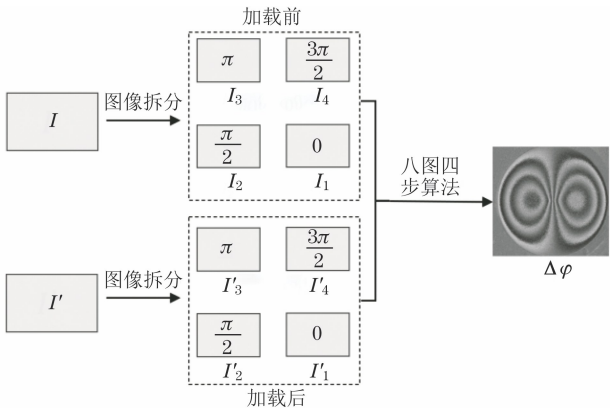


图 4 错位散斑干涉相位图计算流程

2 试验结果与讨论

2.1 检测设备和试验材料

文章设计了试验设备, 其实物如图 5 所示, 其尺寸(长×宽×高)为 120 mm×95 mm×50 mm。在

测量过程中使用分辨率为 2 056 像素×2 464 像素, 带有微偏振片阵列的 CCD 相机记录被测物体变形前后的散斑干涉图;使用波长为 532 nm 的激光器;沃拉斯顿棱镜的错位角为 0.18°;在测试中成像镜头采用焦距为 35 mm 的定焦镜头,最大视场范围为 275 mm×200 mm(长×宽);测试距离为 500 mm。

试验材料如图 6 所示,其中碳纤维层压复合板的尺寸为 100 mm×120 mm(宽×长,下同),厚度为 4 mm。复合板上共有 16 处缺陷,其中埋入直径分别为 3,6,10 mm 的圆形缺陷,深度从左到右依次为 1.5, 1,0.6,0.3 mm。最后一排埋入尺寸分别为 4 mm×4 mm, 10 mm×2 mm, 12 mm×6 mm, 2 mm×10 mm 的矩形缺陷,深度均为 0.5 mm。聚氨酯橡胶复合板的尺寸为 180 mm×250 mm,厚度为 2 mm。将聚氨酯橡胶粘贴在同等大小的金属板上,在金属板上依次钻深度为 2 mm,直径从 2 mm 到 20 mm 依次增加的平底孔,用来模拟材料中的气

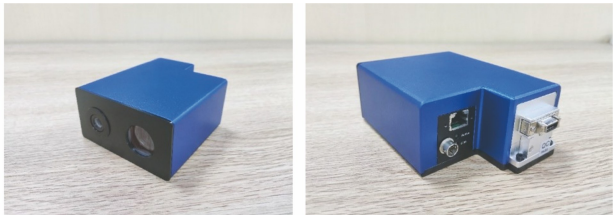


图 5 试验设备实物

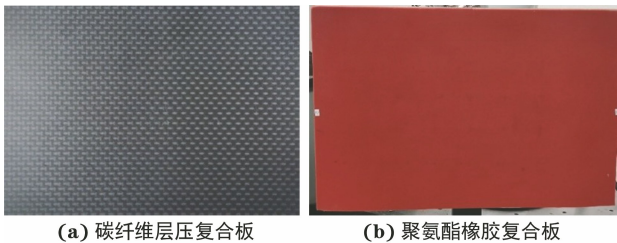


图 6 各类型复合材料测试板

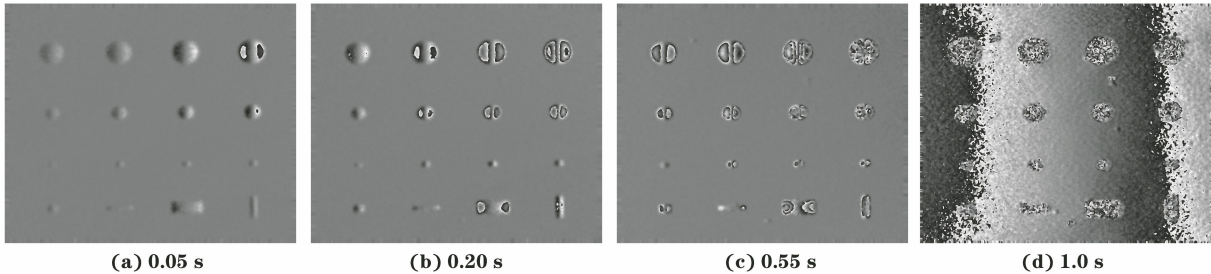


图 7 碳纤维层压复合板缺陷检测结果

聚氨酯橡胶复合板缺陷检测结果如图 8 所示,采集了关灯后 0.5,1.5,2.5 s 时刻的图像。从图 8 中可以看出,缺陷处的条纹变化情况与碳纤维层压复合板上的类似。氨脂橡胶板中 15 处缺陷都能检

泡、未贴合缺陷,缺陷总数为 15 处。
试验采用功率为 375 W 的红外灯对材料进行热加载,缺陷处会因热量不均匀发生应力集中,产生不均匀形变,从而实现检测。热加载是一种方便高效的加载方式,该方法要求检测的材料对温度有较好的敏感性,对于复合材料表面缺陷和内部分层脱黏等缺陷的检测灵敏度较高。另外,因为热加载时缺陷处受热形变较为剧烈不易采集,所以一般都选择在降温阶段进行检测。

2.2 试验结果与讨论

采用热加载方式对上述两种材料进行激光错位散斑干涉检测,对被测试件进行持续 30 s 的热加载,使用关灯后的第一张图片作为参考图,对后续采集的图像进行处理,即可获得加载过程中被测试件缺陷的变化过程。

碳纤维层压复合板的检测结果如图 7 所示,采集了关灯后 0.05,0.2,0.55,1.0 s 时刻的图像进行处理。从图 7 可以看出,不同深度缺陷所测得的条纹级数不同;在相同加载条件下,缺陷处变形量越大,条纹级数越多;在 0.05 s 时刻图中,右上角直径为 10 mm 的圆形缺陷最先出现条纹,这是因为此处缺陷深度较浅,在短暂热加载条件下变形量较大;当温差逐渐加大,图中第一排圆形缺陷处首先出现蝴蝶状条纹;紧接着是第二排;当负载加载到一定程度时,条纹级数逐渐增多变得模糊,只能分辨缺陷的轮廓,如 0.55 s 时刻图中直径 3 mm 的缺陷处出现条纹时,第一排的散斑条纹已经开始模糊;缺陷板中最后一排出现不同矩形状缺陷,说明该检测系统也可以动态地检测出形状不同、方向不同的缺陷。图 7(d)中,碳纤维板较薄,在热加载条件下出现了整体变形,从而影响了成像效果。

测出,但 0.5 s 时刻的条纹对比度较低,2.5 s 时刻的缺陷条纹串联到一起。原因是聚氨酯橡胶复合板在制作缺陷时,橡胶与金属板部分区域未能很好地胶合。

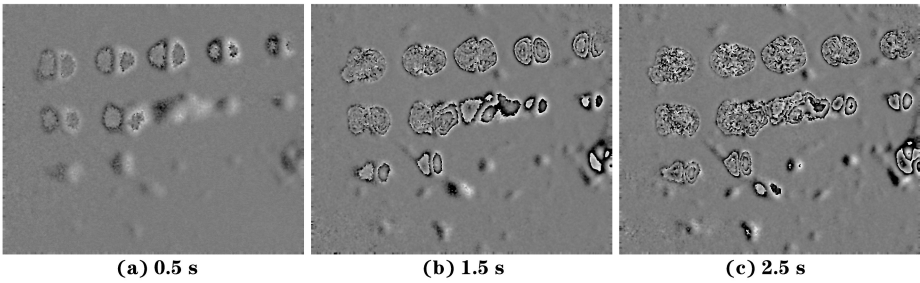


图8 聚氨酯橡胶复合板缺陷检测结果

对两种材料分别进行重复试验,碳纤维层压复合板缺陷的检出率如表 1 所示。聚氨酯橡胶复合板缺陷的检出率如表 2 所示。通过表 1,2 可以看出,文章设计的检测仪对于碳纤维层压复合板中缺陷直径为 3 mm,深度不小于 1 mm 的缺陷检出率较低;对于直径较大的缺陷检出率最高可达 97%;对于矩形缺陷,由于文章使用的是横向错位,所以竖向缺陷的检出率较低。氨酯橡胶复合板中,直径不大于 6 mm 的缺陷检出率较低,对于直径大于 6 mm 的缺陷有较高的检出率。

表 1 碳纤维层压复合板缺陷的检出率

缺陷形状	缺陷大小	缺陷深度	检出率
圆形	Φ 3 mm	≥1 mm	91%
		<1 mm	93%
	Φ 6 mm 和 Φ 10 mm	≥1 mm	95%
		<1 mm	97%
矩形	2 mm×10 mm	0.5 mm	92%
	12 mm×6 mm		94%
	10 mm×2 mm		
	4 mm×4 mm		94%

表 2 聚氨酯橡胶复合板缺陷的检出率

缺陷直径	检出率
≤Φ 6 mm	91%
>Φ 6 mm	95%

通过以上试验证明,在距离 500 mm 处的检测面积最大可达 180 mm×250 mm,可检测到的缺陷直径为 2 mm。重复试验结果表明,在热加载条件下,文章所设计的错位散斑干涉动态检测系统对于碳纤维层压复合板中缺陷检出率最高达 97%,聚氨酯橡胶复合板中缺陷检出率最高可达 95%。

3 结语

将传统沃拉斯顿棱镜与微偏振片阵列相结合,改变了传统的相移方式。利用设计的基于沃拉斯顿棱镜的错位散斑干涉仪对复合材料缺陷进行动态测试,采用热加载方式来检测两种复合材料板中缺陷

的动态变化情况,结果表明,该系统可以对复合材料测试板进行全场检测,同时检测出最多 16 处缺陷;检测最小缺陷尺寸为 ϕ2 mm,检出率最高可达 97%。该错位干涉仪可以满足全场实时、动态测量的要求,在无损检测领域有着较高的应用价值。

参考文献：

[1] GHOBADI A. Common type of damages in composites and their inspections[J]. World Journal of Mechanics, 2017, 7(2): 24-33.

[2] 张旭刚,张素香,程旭,等. 层压结构复合材料的激光剪切散斑检测[J]. 无损检测, 2014, 36(7): 56-59.

[3] 刘元林,赵国金,高帅帅,等. 碳纤维复合材料缺陷无损检测方法研究[J]. 煤矿机械, 2017, 38(12): 64-66.

[4] 刘菲菲,刘松平,傅天航,等. 复合材料结构中 R 区的超声波反射行为及其检测应用[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 35-43.

[5] 程文,张宏菊. 激光剪切散斑检测技术在飞机复合材料检测中的应用[J]. 青岛大学学报:工程技术版, 2012, 27(4): 80-83, 94.

[6] 史建军,李得天. 碳纤维复合材料气瓶的 X 射线实时成像技术[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(6): 65-66.

[7] 曹峰,周庆祥,邱国云,等. 碳纤维复合材料平板分层缺陷的 MIT 检测[J]. 仪表技术与传感器, 2019(7): 96-100, 105.

[8] FRANCIS D, TATAM R P, GROVES R M. Shearography technology and applications: a review [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(10): 102001.

[9] ZHANG F, XIAO Z T, GENG L, et al. Correlation fringe pattern of ESPI generated method based on the orientation partial differential equation [J]. Optics Communications, 2014, 310: 85-89.

[10] FENG Z A, GAO Z, ZHANG X Q, et al. Research on key factors in the digital shearing speckle pattern interferometry[C]//Proc SPIE 9621, 2015, 9621: 62-67.

(下转第 84 页)

申请(专利权)人:国营芜湖机械厂;哈尔滨工业大学
发明人: 阚 艳;范 鑫;单奕萌;赵 勃;史维佳
摘要:本发明提出了模态分解双谱分析的空耦超声应力检测装置及方法,通过激励空耦换能器在待测件中激励出纯净的 A0 模态 lamb 波,确定换能器倾角,确定正弦脉冲信号,经过电压放大器施加在激励空耦换能器,用接收空耦换能器接收回波,通过前置放大器进行低噪声放大,用示波器进行显示并上传至上位机;上位机进行模态分解双谱分析获得准确声时差估计从而实现应力准确表征;本发明采用空气耦合 Lamb 波超声检测,在检测过程中以空气代替了传统超声无损检测中的耦合剂,消除了耦合剂对声时差估计的影响,且模态分解双谱分析方法能够准确获取有无应力的声时差,解决了传统的声时差估计不准而导致的应力测量误差较大,重复性较差等问题。

一种基于非线性调频的 Golay 编码超声激励方法

申请号: CN202210407992.4
公开日期(公开): 2023.04.04
申请(专利权)人: 江苏大学

发明人: 宋寿鹏;董艳梅
摘要:本发明公开了一种基于非线性调频的 Golay 编码超声激励方法,用于超声传感器阵列中相邻阵元的组合激励,可得到增强和高分辨率的超声回波信号。本发明采用非线性调频信号作为载波分别调制 Golay 码互补序列对 A 和 B,得到 NLFM-Golay 编码对,该编码对经过功率放大分别激励超声传感器产生超声波,检测试件后将接收的超声回波分别

进行匹配滤波后再相加,得到超声检测回波信号。该激励方法产生的超声波用于试件检测时回波信号质量得到明显提高,与非线性调频激励相比提高了回波信号的信噪比,使缺陷检测灵敏度提升;与 Golay 码激励相比提高了距离分辨率,便于材料中缺陷的准确量化。

一种混凝土防渗墙体连续完整性及入岩深度的单孔超声检测装置及方法

申请号: CN202210173135.2
公开日期(授权): 2023.04.28
申请(专利权)人: 江西省水利科学院
发明人: 高江林;刘 达;李 焱;胡松涛;张建清;孙 亮;陈 芳;郭洪有
摘要:本发明公开了一种混凝土防渗墙体连续完整性及入岩深度的单孔超声检测装置及方法,检测装置包括设备主机、超声波换能器、超声波信号反馈装置,设备主机包括超声波发射模块、超声波信号采集模块,超声波发射模块用以产生超声波并通过超声波换能器发射出去,超声波换能器用以采集回收反射后的超声波,并将回收的超声波信息转换为电信号输送回设备主机内,信号反馈装置通过判别反射回的超声波进行分析计算得到目标介质的声阻参数,从而判别超声波传播过程中遇到的介质信息。本发明有别于传统的超声波检测设备,采用超声波声压值采集,并通过超声波声压值与目标介质的声阻抗信息关系,实现介质信息的判别以及计算防渗墙的入岩深度。

《无损检测》编辑部
杨思雨 整理



(上接第 81 页)

[11] YAN P Z,LIU X W,WU S L,et al. Pixelated carrier phase-shifting shearography using spatiotemporal low-pass filtering algorithm [J]. Sensors, 2019, 19 (23):5185.
[12] 李慧娟,张京焘,黄振华. 激光剪切散斑方法对脱黏缺陷的定量测量[J]. 宇航材料工艺, 2011,41(5): 85-88.
[13] 徐子鹏,韩旭,李丽娟,等. 碳纤维复合材料冲击损伤

的激光错位散斑检测[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018,41(2):32-35,40.
[14] 郭媛,毛琦,陈小天,等. 双波长剪切散斑干涉法在复合材料缺陷检测中的应用[J]. 光子学报, 2015, 44 (3):188-192.
[15] 李姝欣,杨馥,钟平,等. 基于数字剪切散斑干涉的碳纤维复合材料层压板缺陷检测方法[J]. 应用激光, 2019,39(5):872-879.