

# 激光剪切散斑方法对脱粘缺陷的定量测量

李慧娟<sup>1</sup> 张京焘<sup>1</sup> 黄振华<sup>2</sup>

(1 中国航空综合技术研究所,北京 100028)

(2 辽河油田锦州采油厂,锦州 121209)

**文 摘** 采用胶接方式连接的复合结构在生产制造过程中容易出现脱粘问题,将严重影响产品的结构完整性。采用新型检测方法对脱粘缺陷进行定量测量对于保障产品质量、提高检测效率起到至关重要的作用。本文介绍了激光剪切散斑方法的检测原理、蜂窝夹层结构中脱粘缺陷的形成原因与结构特点及对脱粘缺陷的验收规范。利用激光剪切散斑方法对脱粘缺陷进行检测,分析激光剪切散斑方法对脱粘缺陷进行定量测量的检测精度。通过对已知间距缺陷进行定量测量,检测结果与实际缺陷尺寸吻合较好,检测精度在 10% 以内。结果表明该方法对脱粘缺陷的检测精度能够满足实际生产的检测需要。

**关键词** 激光剪切散斑,检测技术,灵敏度

## Quantitative Measurement for Disbanding Defect Using Shearography

Li Huijuan<sup>1</sup> Zhang Jingtao<sup>1</sup> Huang Zhenhua<sup>2</sup>

(1 China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028)

(2 Liaohe Oilfield Company Jinzhou Oil Production Plant, Jinzhou 121209)

**Abstract** The disbanding defect is prone to be produced during adhesive bonding process. The integrality, strength and rigidity of product would be broken by disbanding. Investigating the capability of quantitative measurement and accuracy of shearography method is more impotent to ensure the product quality and testing efficiency. This paper presents the test principle of shearography, the characteristic acceptance specification of disbanding defect. The detecting sensitivity and accuracy of quantitative measurement is investigated when shearography method is used for inspecting disbanding on honeycomb structures. The quantitative measurement result shows that the measurement result is equal to the trim size and the accuracy is less than 10%. The shearography method could be used for inspecting the honeycomb structure products.

**Key words** Shearography, Testing method, Sensitivity

### 0 引言

蜂窝夹层结构以其较高的比强度、较好的隔热性、耐冲击等优点而广泛应用于航空、航天等许多领域中的关键零部件。这些零部件的检测质量直接影响到航空、航天器的生产质量,因此选择适当、便捷的无损检测方法就尤为重要。

蒙皮一般采用弹性模量较大、强度较高的薄板材料<sup>[1-4]</sup>。具有一定高度的轻质蜂窝芯一般采用纸、玻璃布、铝合金、芳纶纸等材料制成,利用其将面板隔开,使蜂窝夹层结构具有较大的横断面惯性矩及较高的比强度。蜂窝夹层结构实际检测中遇到最多的缺

陷为脱粘。脱粘可能出现在蒙皮与胶层之间、胶层与蜂窝芯子之间;由于制作过程中胶层不均匀或压制抽真空过程中的不当操作,容易形成蒙皮与蜂窝芯子之间缺少胶层而导致的脱粘。脱粘缺陷严重影响蜂窝夹层结构的结构完整性、力学性能及可靠性,因此需要对脱粘缺陷进行严格控制。实际产品检测过程中,产品验收关键依据为单一缺陷大小及相邻两缺陷间距离。目前已经能够利用激光剪切散斑方法对蜂窝夹层结构中脱粘缺陷大小进行检测,但利用此方法进行定量测量的研究仍无定论。难以确定激光剪切散斑方法对蜂窝夹层中脱粘缺陷的最小可检尺寸及其

收稿日期:2011-01-11

基金项目:航空科学基金项目(2009ZD41004)

作者简介:李慧娟,1980年出生,工程师,主要从事红外、激光无损检测方法的研究。E-mail:lhj1900@126.com

检测精度。

本文介绍了蜂窝夹层结构中典型脱粘缺陷特点,实际生产过程中对脱粘缺陷的验收规范。利用激光剪切散斑方法对脱粘缺陷进行检测,分析其对脱粘缺陷进行定量检测的准确性及所能达到的检测精度。

### 1 激光剪切散斑检测原理

电子剪切散斑干涉也称为电子错位散斑干涉,是基于激光散斑效应,在用激光照射粗糙表面时发生的现象。其检测原理为:一束激光扩束后投射到被测量表面上,反射光(也称物光)直接投射到摄像机(CCD),摄像机前的剪切镜将此反射光分为稍微错开的两个图像。这两个图像互为物光、参考光,发生干涉,摄像机记录干涉的斑点图像。分别记录对被测量表面加载前后的散斑干涉图,并对其进行数字图像处理,得到的干涉条纹可以显示出斑点结构中的变化,反映了被测物体的表面位移或变形的变化<sup>[5-6]</sup>。根据这些数据,可以获得被测物体的变形、位移、应变、应力集中、振动模式以及更多的信息。

#### 1.1 检测系统光路

激光剪切散斑成像检测成像原理光路如图1所示,在相机镜头前放置一个小角度的玻璃楔块。当物体上某点  $P_1$  来的光线通过玻璃楔块覆盖的一半透镜时发生偏离,该光线和相邻点  $P_2$  通过另一半透镜的光线相遇成像于相机像平面上同一点  $P$ ,形成剪切相干图像。

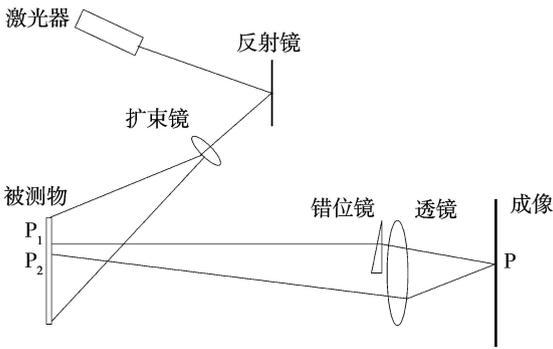


图1 激光剪切散斑检测原理图

Fig.1 Principle of shearography

设玻璃楔块光楔角在平行于  $xy$  的平面上,则光线通过玻璃楔块时在  $x$  方向上被横向偏移(错位),假设玻璃楔块与透镜靠得很近,在像面内总的偏移量(错位量)为:

$$\Delta x' = D_1(\mu - 1)\alpha \quad (1)$$

式中,  $D_1$  为像距,  $\mu$  为玻璃楔块折射率,  $\alpha$  为玻璃楔块光楔角。

折合到物体表面的等值偏移量  $\Delta x$  为:

$$\Delta x = \Delta x' \frac{D_0}{D_1} = D_0(\mu - 1)\alpha \quad (2)$$

式中,  $D_0$  为物距。同样,如玻璃楔块光楔角沿  $y$  方向则偏移(错位)也沿  $y$  方向。由以上两式可知,改变  $D_0$  和  $\alpha$  可修正剪切量。

#### 1.2 缺陷位置散斑条纹形成原理

物体在像平面上形成两个错位的像,它们在像平面上所产生的光波振幅分别为:

$$U(x, y) = a \exp[\theta(x, y)] \quad (3)$$

$$U(x + \delta x, y) = a \exp[\theta(x + \delta x, y)] \quad (4)$$

式中,  $a$  为光振幅分布,  $\theta(x, y)$  为像的相位分布。

在像平面上两个像的叠加结果为:

$$U_T = U(x, y) + U(x + \delta x, y) \quad (5)$$

其光强为:

$$I = U_T U_T^* = 2a^2 [1 + \cos \varphi_x] \quad (6)$$

$$\varphi_x = \theta(x + \delta x, y) - \theta(x, y)$$

物体变形后,由于两点之间光程变化而发生两个波前之间相应的相位变化  $\Delta x$  变形后的光强变为:

$$I' = U'_T U'_T{}^* = 2a^2 [1 + \cos(\varphi_x + \Delta x)] \quad (7)$$

电子剪切散斑采用光电子器件(通常为 CCD 摄像机)进行记录并直接输入计算机。由于它能快速得到位移导数而无需进行光学傅里叶滤波,因而直接用变形前后两幅散斑图像进行相减,其合成的光强为式(6)和(7)相减。

$$I_T = |I - I'| = \left| 4a^2 \sin\left(\varphi_x + \frac{\Delta x}{2}\right) \sin \frac{\Delta x}{2} \right| \quad (8)$$

这种相减方式把本底光强或者背景光强去除了,而突出由于物体变形引起相位变化  $\Delta x$  的结果。由式(8)可知,当  $\Delta x = 0, \pm 2\pi, \dots, \pm 2n\pi$  时,  $I_T = 0$ , 即为暗条纹<sup>[7]</sup>。普通剪切散斑图像质量较差,采用滤波及相位测量进一步处理后能够得到质量清晰的图像。

对于蜂窝夹层结构中脱粘缺陷进行检测时,在存在脱粘位置形成的散斑条纹如图2所示。

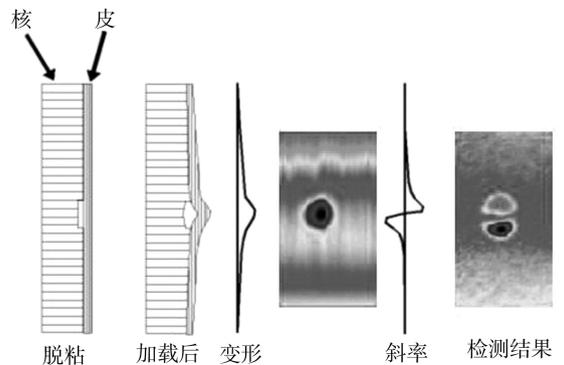


图2 干涉条纹图像形成原理

Fig.2 Principle of interference speckle pattern

## 2 蜂窝夹层结构脱粘缺陷

## 2.1 脱粘缺陷形成

蜂窝夹层结构在制作过程中,容易由于胶层不均匀或压制抽真空过程中的不当操作形成脱粘。实际生产检测过程中根据蜂窝夹层结构所应用范围的差异,其验收规范存在很大差异,对于缺陷大小,验收标准一般为 $400\text{ mm}^2$ 左右,对于缺陷间距一般在 $20\text{ mm}$ 左右,无论是要求对缺陷大小进行检测,还是对缺陷间距进行控制时,均需对检测方法的定量检测能力进行分析及研究,因此,选择具有固定缺陷尺寸、脱粘缺陷试件作为研究对象。

由于蜂窝夹层结构产品在制造过程中形成的脱粘缺陷形状不规则、尺寸不固定,难以用于定量测量的理论研究,故选用飞机雷达罩及卫星产品中所使用的铝蒙皮蜂窝结构,在其内部制作具有固定形状、尺寸及位置的脱粘缺陷试件,其缺陷形式、材料类型、蒙皮厚度、胶层类型、制作工艺与实际产品完全一致。

## 2.2 脱粘缺陷设计

为与实际产品保持一致,采用厚度为 $1.0\text{ mm}$ 的铝板作为蒙皮材料,蜂窝芯材料为铝,蜂窝芯格边长为 $5\text{ mm}$ ,高度为 $15\text{ mm}$ 。内部缺陷为圆形和方形两种,其中圆形缺陷直径为 $10\text{ mm}$ ,方形缺陷边长为 $10\text{ mm}$ ,缺陷间距离分别从 $0$ 至 $30\text{ mm}$ 递增。设计制作相同大小、不同间距脱粘缺陷,如图3所示。

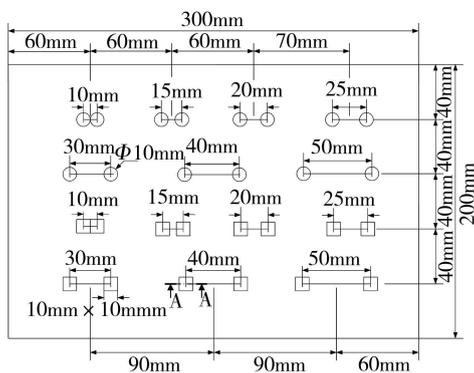


图3 脱粘缺陷试块设计图

Fig. 3 Defect plan

根据验收标准要求,激光剪切散斑方法能够应用于实际生产检测的前提条件为:能对间距为 $20\text{ mm}$ 的相邻脱粘缺陷进行有效区分,并能检测出面积大于 $400\text{ mm}^2$ 的单一脱粘缺陷。因此,分别对图3中间距为 $0\sim 50\text{ mm}$ 的已知缺陷组进行检测,并对相邻缺陷间距进行定量测量,将测量值与实际值进行比较,分析激光剪切散斑方法对脱粘缺陷检测的适用性及定量测量能力。

当激光剪切散斑方法不能区分某一间距的两个缺陷时,证明此方法对 $1.0\text{ mm}$ 深缺陷的定量测量能力在此间距值以下;当激光剪切散斑方法能够将某一宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2011年 第5期

间距的两缺陷进行区分,证明此方法对 $1.0\text{ mm}$ 深缺陷的定量测量能力在此间距值以上。激光剪切散斑方法不能区分某一间距的两个缺陷时,此缺陷组将作为单一缺陷进行验收,容易导致误判而影响产品质量。

## 3 检测过程

### 3.1 检测设备

实际检测系统主要由激光电子散斑探头、探头操纵遥控装置、散斑图像处理显示单元和加载单元构成,加载单元一般有热加载、真空加载、振动加载、压力加载、微波加载形式,本试验采用最常用的热加载装置(红外热辐射石英灯)和真空加载装置(便携式真空罩)。

试验采用美国LTI公司生产的LTI5100便携式激光剪切散斑检测设备,激光器为NdYag绿光,波长为 $532\text{ nm}$ ,功率为 $150\text{ mW}$ ;散斑探头像素为 $1350\times 1024$ ,帧频为 $30\text{ 帧/s}$ ,错位角度为 $0^\circ\sim 5^\circ$ ;热加载装置为石英灯,功率为 $1\text{ kW}$ 。

### 3.2 试验参数

检测试验在室温下进行,对蒙皮厚度为 $1.0\text{ mm}$ 的蜂窝夹层结构可以采用热加载方法进行激励。石英灯、摄像机与激光器处于同一平面上,通过操纵遥控台调节激光焦距使试件能够全部位于激光照射范围内,同时保证石英灯能够对检测试件的全部表面进行加载。根据预估缺陷的大小调节剪切角,以便能够检测出试件内最小尺寸的缺陷。

对于厚度较薄的铝蒙皮结构可采用热加载激励方式。对 $1.0\text{ mm}$ 的铝蒙皮蜂窝夹层结构,可采用热激励方式,加载距离为 $1\text{ m}$ ,加载功率为 $1\text{ kW}$ ,加载时间为 $40\text{ s}$ ,剪切角为 $2^\circ$ 。

### 3.3 检测结果

利用检测参数对所设计脱粘缺陷进行检测,结果如图4所示。

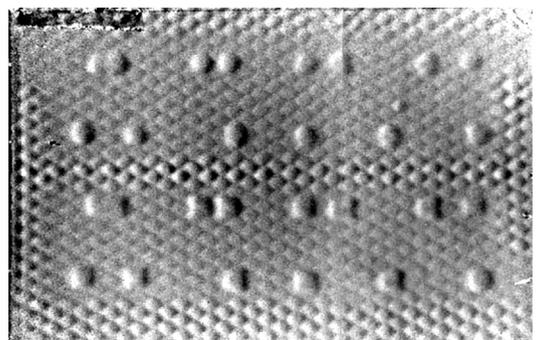


图4 试件检测结果

Fig. 4 Test result of specimen

从图4中可以看出,结果中能够完全反应设计图中包括的全部缺陷,缺陷在试件中位置、各缺陷相对

位置、缺陷大小均与设计图一致。第一排与第三排中的第一组中两缺陷间距为0,圆形缺陷表现为相切形式,方形缺陷表现为相连而形成一缺陷。在结果图中这两组缺陷均不能将缺陷进行区分,表现形式为一个缺陷。对于其他组缺陷,缺陷间距分别从5至30 mm不等,在结果图中均能对缺陷进行明确区分。

图5中给出试件左上角部分结果显示图,图中对缺陷间距进行测量。从图5中可以看出,第二组缺陷间距测量值为4.785 mm、第五组为20.045 mm。可知,当缺陷间距较小时对间距进行测量精度较低,测量精度随间距增大而不断提高。将试件中第一排至第二排中除第一组外的其余六组缺陷间距分别进行测量,测量值与误差率如表1所示。

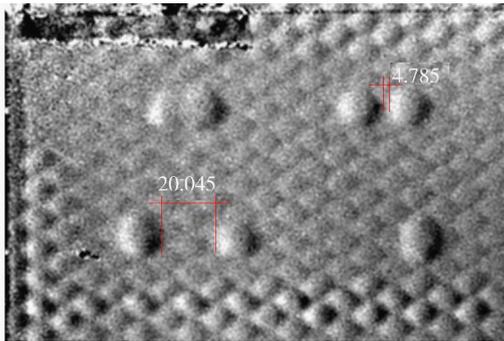


图5 左上角测量结果  
Fig. 5 Measurement result of left corner

表1 检测结果与设计结果的误差

Tab.1 Error between designed and measured defects

| mark | measured/mm | designed/mm | error/% |
|------|-------------|-------------|---------|
| 2    | 4.785       | 5           | 4.30    |
| 3    | 10.277      | 10          | 2.77    |
| 4    | 15.186      | 15          | 1.24    |
| 5    | 20.045      | 20          | 0.23    |
| 6    | 24.447      | 25          | 2.21    |
| 7    | 31.830      | 30          | 6.10    |

激光剪切散斑检测方法能够对5~30 mm的两相邻缺陷进行区分,缺陷间距为5 mm时误差达4.3%,随缺陷间距增加,误差逐渐降低,即误差随缺陷间距增加而增加,测量值与实际设计值之间误差均小于10%。从检测误差可看出,对脱粘缺陷间距的检测精确性随缺陷间距的增加呈现逐步增加后逐渐减小的趋势,测量灵敏度与缺陷间距大小存在直接关系,图6中给出检测精度与测量间距之间的对应关系。激光剪切散斑方法对间距为20 mm相邻缺陷进

行定量测量时精度最高,随后逐渐降低。由于在实际产品检测时对缺陷间距的验收规范为20 mm左右(根据产品特点及所处部位不同而存在差异),可以说激光剪切散斑方法检测灵敏度能够完全符合实际生产需要。

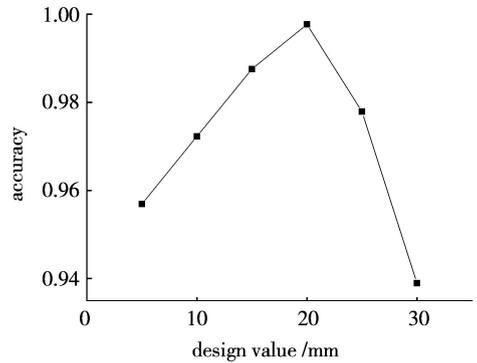


图6 检测精度变化规律  
Fig. 6 Regularity of sensitivity

#### 4 结论

(1)一种非接触、快速的激光剪切散斑方法,能够准确检测出蒙皮厚度为1.0 mm蜂窝夹层结构中全部直径大于10 mm的脱粘缺陷,能够满足实际产品检测需求。

(2)激光剪切散斑方法能够对蜂窝夹层结构中间距 $\geq 5$  mm的脱粘缺陷进行有效测量,检测误差在10%以内,能够满足实际产品验收规范要求。

#### 参考文献

[1] 薛书文,等. 利用红外热成像技术检测金属内部近表面缺陷[J]. 红外与毫米波学报,1998,17(6):424-428

[2] Balageas D L, Krapez J C. Pulsed photothermal modeling of layered materials[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 59(2):348-357

[3] Hobbs C, Temple A. The inspection of aerospace structures using transient thermography [J]. British J. of NDT, 1993, 35:183-189

[4] 徐淦卿,陈珏,程东杰. 红外物理与技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1989

[5] 秦玉文,戴嘉彬,陈金龙. 电子散斑方法的进展[J]. 试验力学,1996,4(11):410-416

[6] Li Huijuan, Shuai Jiasheng. Laser shearography test method used for honeycomb structure[J]. Infrared and Laser Engineering. 2009,38(Supplement):324-329

[7] 李慧娟,帅家盛. 基于激光剪切散斑技术的蜂窝夹层结构检测[J]. 红外与激光工程,2009,38(增刊):324-329

(编辑 李洪泉)