

# 结构参数对蜂窝复合材料错位散斑检测结果的影响

贾晓艳<sup>1</sup>, 马铁军<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640;

2. 广州华工百川科技股份有限公司, 广州 510530)

**摘要:**为得到蜂窝结构参数对错位散斑无损检测结果的影响,运用有限元对真空加载下蜂窝结构错位散斑检测过程的变形情况进行了计算。基于周边固定支撑的圆形薄板在均匀载荷下变形的模型推导了蜂窝材料无损检测中缺陷离面位移最大值的理论公式。有限元软件对 Abaqus 进行了二次开发,分析了载荷、缺陷大小、蒙皮厚度及蜂窝层厚度对离面位移最大值的影响,在其他条件一定时,离面位移最大值与载荷成正比,与缺陷半径的 4 次方成正比,与蒙皮厚度的 3 次方成反比,与蜂窝高度无关。对蜂窝材料进行有限元仿真及错位散斑无损检测试验,验证了仿真的可靠性,为实际检测提供理论指导。

**关键词:**蜂窝结构;错位散斑无损检测;有限元;离面位移

中图分类号:TB331;TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2015)04-0014-05

## Effect of Honeycomb Complicated Material Structure on Shearography

JIA Xiao-yan<sup>1</sup>, MA Tie-jun<sup>1,2</sup>

(1. School of Machine and Automobile, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou SCUT Bestry Technology Corporation, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to find the effects of honeycomb material parameters on results in shearography NDT for honeycomb materials, calculations by finite element method are made. The theoretical formula of off-plane displacement of defect in shearography NDT for honeycomb materials is deduced based on the model of clamped circular thin plate under uniformly distributed load. The secondary development of Abaqus is made based on python, the process of shearography NDT for honeycomb materials is simulated by finite element method, the effects of load, defect size, skin thickness and honeycomb thickness on the maximum of off-plane displacement are analysed; when other conditions are fixed, the maximum of off-plane displacement is proportional to load and is the forth power of defect radius, it is inversely proportional to the third power of skin thickness and it has nothing to do with honeycomb thickness. Simulation by finite element method and experiment of shearography NDT for honeycomb materials are made, the reliability of simulation is verified, and simulation can provide theoretical guidance for practical detection.

**Keywords:** Honeycomb structure; Shearography NDT; Finite element method; Off-plane displacement

蜂窝夹芯复合材料具有质量轻、比强度高、比刚度高等特点,被广泛应用于航空航天、交通运输、机械制备等领域<sup>[1-2]</sup>。但蜂窝材料在制造和使用的

过程中,会产生内部缺陷<sup>[3]</sup>,导致材料的性能下降,甚至会引发严重的后果,因此在出厂前和使用过程中必须对其进行无损检测<sup>[4]</sup>。错位散斑干涉技术是基于缺陷在载荷作用下表面产生微变形,通过 CCD 对缺陷变形前后激光散斑场的采集,并利用图像处理等技术分析缺陷位置、大小的新一代无损检测技术<sup>[5]</sup>,具有全场、非接触、高精度<sup>[6-7]</sup>、实时性和抗震

收稿日期:2014-06-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21144005/B040607)

作者简介:贾晓艳(1988—),女,硕士研究生,主要从事橡胶机械,无损检测方面的研究工作。

性<sup>[8]</sup>等特点。其检测方法是先用 CCD 采集一张待测物体的原始散斑图,再对待测物体进行加载(加载方式有真空加载、热加载<sup>[9-10]</sup>等),采集加载后的散斑图再对两幅图进行图像处理,由于材料内部有缺陷的位置在加载条件下会产生微小变形,所以对两幅图进行图像处理在缺陷位置会出现蝴蝶斑,从而检测到缺陷信息<sup>[11]</sup>。

笔者运用有限元软件 Abaqus 对蜂窝材料在真空加载下的变形进行仿真,为避免建模等繁琐过程,基于 Python 语言对 Abaqus 进行了二次开发,创建了用户图形界面(GUI);研究了真空加载条件下缺陷离面位移最大值与载荷、缺陷大小、蒙皮厚度及蜂窝高度的关系。运用有限元对蜂窝材料在真空加载下变形的分析,能够避免实际检测过程中噪声等因素对检测过程的影响,从而排除干扰,更准确地得到离面位移与各参数的关系<sup>[12]</sup>,为实际检测提供理论指导。

## 1 蜂窝材料有限元模型描述

图 1 为蜂窝材料有限元模型,由三层组成,上下层为蒙皮,中间为蜂窝层,蜂窝为正六边形结构,两板与蜂窝层由粘合剂粘为一体。

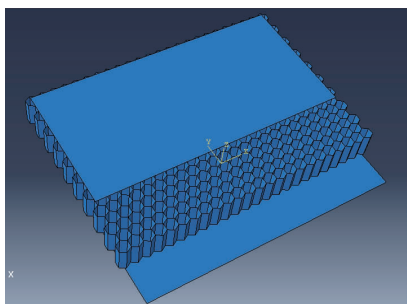


图 1 蜂窝材料模型

检测时缺陷部位产生离面位移,郭广平<sup>[13]</sup>的“对点位移差”理论认为:

$$\delta w = n \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

式中:  $\delta w$  为距离为一个错位量的两点的离面位移差;  $\lambda$  为激光波长;  $n$  为条纹级次。

当激光波长一定时,条纹级次反映了相邻一个剪切量的两点的离面位移差<sup>[14]</sup>,因此,缺陷的离面位移差越大,条纹级次越多,则越容易被检测到。

## 2 离面位移理论值

在材料的蜂窝层挖孔模拟内部缺陷,在铝蒙皮上加负压模拟无损检测过程中蜂窝材料在真空罩

中的受力情况。受力变形的铝蒙皮模型可以简化为周边固定支撑的圆形薄板在均布载荷下变形的模型,变形的离面位移最大值即为圆形薄板在均布载荷下中心处的挠度。模型描述如图 2 所示,圆形薄板的半径为  $R$ ,厚度为  $h$ ,变量半径为  $r$ ,所受均布载荷为  $q$ 。

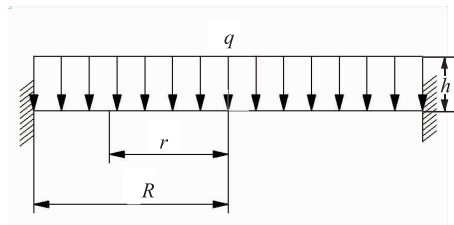


图 2 受均布载荷的固定支撑圆板

以  $w$  表示挠度,则周边固定支撑的圆形薄板在均布载荷下挠度的微分方程为<sup>[15]</sup>:

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{qr}{2D} \quad (2)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (3)$$

式中:  $E$  为薄板材料的弹性模量;  $\mu$  为泊松比;  $D$  为圆形薄板的抗弯刚度。

对于圆形薄板,在中心  $r = 0$  处曲面斜率与挠度均为有限值。周边固定支撑的圆形薄板在支撑处不允许有挠度和转角。根据上述边界条件,计算得:

$$w = \frac{q}{64D} (R^2 - r^2)^2 \quad (4)$$

当  $r = 0$  时,圆形薄板的最大挠度的理论值为:

$$w = \frac{q}{64D} R^4 = \frac{3qR^4(1-\mu^2)}{16Eh^3} \quad (5)$$

$w$  即为周边固定支撑的圆形薄板的离面位移最大值。

## 3 基于 Abaqus 二次开发的有限元仿真

仿真模型采用铝蒙皮,中间为铝蜂窝层,蜂窝尺寸为直径 5 mm 的圆的内接正六边形。铝的弹性模量为 70 GPa,泊松比为 0.3。为避免繁琐的建模过程,用 Python 语言对 Abaqus 进行二次开发,创建 GUI<sup>[16]</sup>。考虑到缺陷大小的建模受到蜂窝形状的影响,因此缺陷半径的影响采用单独建模分析的方式,故创建的 GUI 只包含压力(Pressure)、蒙皮厚度(Skin Thickness)和蜂窝高度(Honeycomb Thickness)三个参数,如图 3 所示。

### 3.1 载荷对蜂窝材料的影响

在蜂窝材料中间蜂窝层挖掉一个半径约为

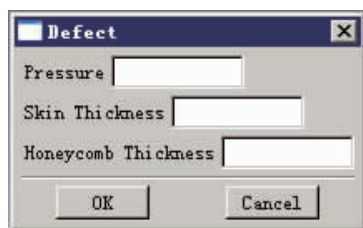


图3 基于 Abaqus 二次开发的缺陷参数的用户图形界面

25 mm 的孔来模拟内部缺陷。在 GUI 中输入蒙皮厚度 0.001 m, 蜂窝高度 0.01 m, 压力值分别从 1 000~10 000 Pa 变化, 间隔为 1 000 Pa, 图 4 为载荷及其对应的离面位移最大值的关系曲线。

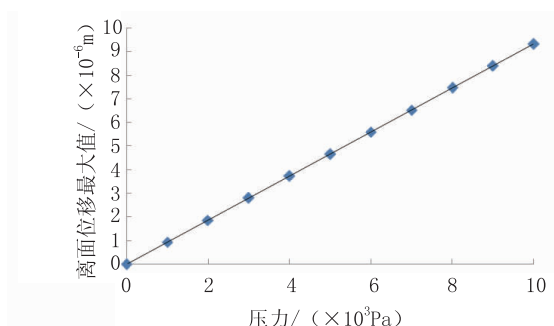


图4 载荷与离面位移最大值的关系

计算得到图 4 的曲线函数约为:  $w = 9.3 \times 10^{-10} q$ 。由于挖孔过程中需考虑蜂窝形状的影响, 因此实际所挖孔的半径约处于 25~26 mm 之间。分别将半径及材料参数代入理论公式得:

$$R = 25 \text{ mm}, w = 8.477 \times 10^{-10} q \quad (6)$$

$$R = 26 \text{ mm}, w = 9.917 \times 10^{-10} q \quad (7)$$

可以看出仿真结果介于两者之间, 可认为仿真结果与理论公式一致。因此, 当其他条件一定时, 离面位移最大值与载荷呈线性关系。所以, 随着载荷的增大, 离面位移最大值也增大, 表明对一定的缺陷, 增大载荷时, 缺陷更容易被检测出来。

### 3.2 缺陷尺寸的影响

压力值为 6 000 Pa, 蒙皮厚度为 0.001 m, 蜂窝高度为 0.01 m, 对半径按 5~45 mm 变化, 间隔为 5 mm 的缺陷进行仿真, 得到离面位移最大值与缺陷半径的关系如图 5 所示。图 5 的拟合结果约为  $w = 13.94R^4$ ; 理论结果为  $w = 13.01R^4$ 。仿真结果与理论结果的系数误差为 7.15%, 由于仿真过程中挖孔受蜂窝结构约束以及网格划分等因素的影响, 可认为模拟结果与理论结果基本一致。因此, 蜂窝材料在真空加载无损检测时, 当其他条件一定时, 缺陷离面位移最大值与缺陷半径的 4 次方成正比, 即

缺陷半径增大时, 离面位移最大值以缺陷半径 4 次方的速率迅速增大, 所以缺陷尺寸越大, 越容易被检测出来。

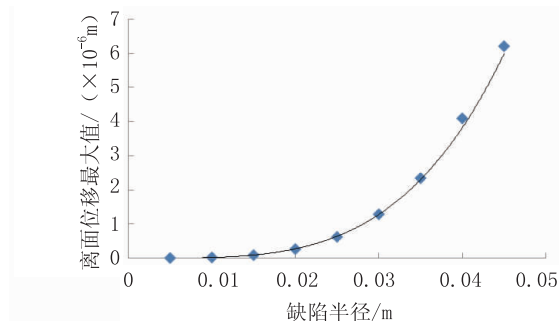


图5 缺陷半径与离面位移最大值的关系

### 3.3 蒙皮厚度的影响

缺陷仍是半径约 25 mm 的孔, 在 GUI 上分别令蒙皮厚度从 0.5~2.5 mm 变化, 间隔 0.25 mm, 压力为 6 000 Pa, 蜂窝高度为 0.01 m, 点击 OK 运行, 得到离面位移最大值与蒙皮厚度的关系, 如图 6 所示。计算得拟合曲线函数约为:  $w = 5.16 \times 10^{-15} h^{-3}$ 。理论结果为  $w = 5.085 \times 10^{-15} h^{-3}$ , 仿真结果与理论公式的误差为 1.47%, 可以看出模拟结果与理论公式基本一致。所以, 对蜂窝材料真空加载无损进行检测时, 当其他条件一定时, 缺陷离面位移最大值与蒙皮厚度的 3 次方成反比, 因此在蒙皮厚度增大时, 缺陷的离面位移急剧减小, 检测的难度增大。

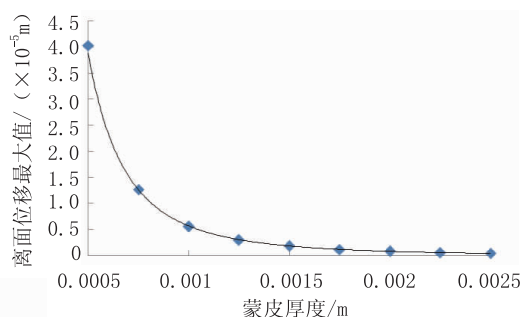


图6 蒙皮厚度与离面位移最大值的关系

### 3.4 蜂窝高度的影响

压力为 6 000 Pa, 蒙皮厚度为 1 mm, 蜂窝高度分别为 10, 20, 30, 40 mm, 缺陷半径为 25 mm, 得到离面位移的最大值分别为  $5.589 \times 10^{-6}$ ,  $5.654 \times 10^{-6}$ ,  $5.663 \times 10^{-6}$ ,  $5.667 \times 10^{-6}$  m, 可以看出, 随着蜂窝高度增加, 离面位移最大值只发生微小变化, 可认为蜂窝高度对缺陷变形无影响。

## 4 蜂窝材料无损检测试验与仿真对比

### 4.1 蜂窝材料错位散斑无损检测试验

图7为真空加载无损检测仪,由广州华工百川科技股份有限公司研制。装置的主体部分为真空罩,真空罩的上方为检测头,检测头内置有激光器、扩束镜、渥拉斯顿棱镜、CCD等,可以实现对变形前后图像的采集。检测头末端的数据线将采集到的数据传送到计算机上,可实现对散斑图像的实时处理及分析。根据真空罩内部结构的不同,可以对材料进行真空加载和热加载两种方式检测。此装置具有便携、检测精度高、检测速度快、全场、实时、非接触等特点。



图7 复合材料无损检测仪

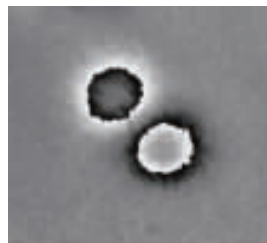
试验对象为铝蜂窝材料,上下蒙皮厚度为1 mm,蜂窝层厚度为30 mm,蜂窝尺寸为直径5 mm的圆的内接正六边形,在蜂窝层挖一个半径为10 mm的圆孔,并在圆孔背部贴上玻璃片将其密封,以此来模拟材料内部缺陷,如图8所示。试验前先对装置进行标定,具体操作为运用无损检测仪对已知变形量的缺陷板进行检测,采集图像,并进行相位解包裹、积分,将得到的结果与已知变形量进行对比计算,得到其换算关系。



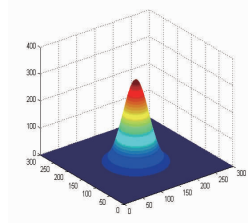
图8 蜂窝板及缺陷

试验时在真空罩内抽取5 000 Pa真空,经过图像采集及处理得到圆孔处变形的相位图,对相位图

进行相位解包裹及积分,得到缺陷变形的三维模型,缺陷相位图及三维图如图9所示。根据标定试验进行换算,得到缺陷变形的离面位移最大值为 $0.1875\text{ }\mu\text{m}$ 。



(a) 试验结果



(b) 缺陷三维图

图9 试验结果及缺陷三维图

### 4.2 蜂窝材料错位散斑无损检测仿真

运用有限元建立上述试验模型并进行仿真,仿真结果如图10所示。图10离面位移的最大值为 $1.974\times 10^{-7}\text{ m}$ ,即 $0.1974\text{ }\mu\text{m}$ ,与试验结果的误差为5.02%,由于试验过程中有噪声等干扰因素的影响,可认为试验结果与仿真结果基本一致。通过试验及仿真的对比,验证了仿真结果的可靠性,同时由于仿真能够排出干扰因素,可为以后的试验提供理论指导。

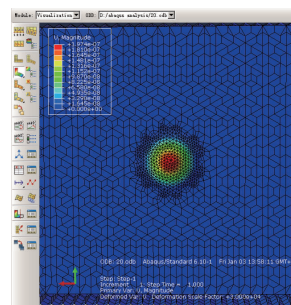


图10 仿真结果

## 5 结论

(1) 具有圆形缺陷的蜂窝材料无损检测模型可简化为周边固定支撑的圆形薄板在均布载荷下变形的模型,理论可求得圆板中心处的挠度即离面位



移最大值。

(2) 在蜂窝材料真空加载错位散斑无损检测的过程中,当其他条件一定时,缺陷离面位移最大值与载荷成正比,因此增大载荷可使缺陷更易被检测出来;与缺陷半径的4次方成正比,表明离面位移最大值对缺陷半径非常敏感,大的缺陷很容易被检测到;与蒙皮厚度的3次方成反比,表明蒙皮厚度对检测结果的影响也很大,随着蒙皮厚度的增加,缺陷更加难被检测出来。

(3) 通过对蜂窝材料错位散斑无损检测试验和仿真结果的对比,验证了仿真结果的可靠性,同时由于仿真具有排除噪声等干扰因素的功能,可以为以后的检测提供理论指导。

#### 参考文献:

- [1] HE Mei-feng, HU Wen-bin. A study on composite honeycomb sandwich panel structure[J]. Materials & Design, 2008, 29(3): 709-713.
- [2] 郭广平, 刘永斌, 王钰, 等. 蜂窝结构的错位散斑无损检测技术[J]. 无损检测, 2004, 26(12): 605-608.
- [3] 张坚, 耿荣生. 复合材料的现场电子剪切散斑检测技术研究[J]. 无损检测, 2007, 29(7): 378-381.
- [4] JOHN W N. Aerospace NDT with advanced laser shearography[C]// 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai: 2008.
- [5] SHANG H M, HUNG Y Y, LUO W D, et al. Surface profiling using shearography[J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 23-31.
- [6] 蔡长青, 贺玲凤. 基于四步相移的相位差提取方法

[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2011, 39(9): 93-96.

- [7] 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.
- [8] 陈新波, 孙金立, 袁英民, 等. 在役航空器上复合材料的综合检测与评价[J]. 无损检测, 2013, 35(7): 50-53.
- [9] HUANG Y H, NG S P, LIU L, et al. NDT&E using shearography with impulsive thermal stressing and clustering phase extraction[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(7/8): 774-781.
- [10] 张咏军, 张咏红, 王航宇. 无损检测新技术在航空工业中的应用[J]. 无损检测, 2011, 33(3): 43-46.
- [11] 蔡长青. 散斑干涉计量关键问题研究及其应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [12] VANESSA R, ZHANG Li-hong, FABRICE M, et al. Out-of-plane displacement derivative measurement: comparison of results obtained by a shearographic interferometer using the separation of the polarization states and the finite element method[C]// Proc. of SPIE, [S. l.]: [s. n.], 2006.
- [13] GUO Guang-ping, QIN Yu-wen. Quantitative analysis on sensitivity of shearography in NDT[C]// Proceedings of Third International Conference on Experimental Mechanics, [S. l.]: [s. n.], 2001: 341-344.
- [14] 郭广平. 计算机模拟技术在错位散斑干涉法中的应用[J]. 机械工程学报, 2001, 37(11): 103-105.
- [15] 郑津洋, 董其伍, 桑芝富, 等. 过程设备设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 52-60.
- [16] 曹金凤, 王旭春, 孔亮, 等. Python语言在Abaqus中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

## 专题(GB/T 11345—2013 系列标准评析)征稿启事

2013年9月18日正式发布的钢焊缝超声检测国家标准 GB/T 11345—2013《焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定》、GB/T 29711—2013《焊缝无损检测 超声检测 焊缝中的显示特征》和 GB/T 29712—2013《焊缝无损检测 超声检测 验收等级》于2014年6月1日起实施。而旧版本标准 GB/T 11345—1989《钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果分级》是1989年5月8日发布,1990年1月1日起实施的,新老标准交替的周期为24年。新标准发布与实施以来,引起了业界,尤其是从事焊缝超声检测相关工作人员的广泛关注。为了帮助同行更好地理解 and 执行 GB/T 11345—2013 系列标准,本刊拟于近期推出“GB/T 11345—2013 系列标准评析”专题,特向行业内相关专家、学者及工程检测人员征稿。

#### 征稿内容:

(1)新标准的主要内容及与旧版本的比较;(2)对新标准中变化内容的理解;(3)为适应新标准的变化,实际检测工作中做了哪些工作,还存在哪些疑问或困难;(4)对正确执行或实施标准的建议。

#### 征稿要求:

(1)文章请按照本刊已发表论文的格式撰写,长短不限,能够表述清楚即可;(2)请在2015年4月28日前将稿件发送至编辑部邮箱,并注明“GB/T 11345 系列标准征稿”字样;(3)对参与讨论的文章,经审核后择优发表。

《无损检测》编辑部