

# 实时成像技术在钎焊蜂窝结构检测上的应用

王丙阳,周炳如,晏峰峰

(北京航空制造工程研究所,北京 100024)

**摘要:**介绍了金属蜂窝钎焊件生产制造过程中的实时成像检测。传统射线照相技术受限于管径及射线束角度,透照有效区域小,大型蜂窝结构件检测效率低;同时还会发生由于工件厚度变化致使芯格影像变形的问题,影响检测结果的判断。运用实时成像技术对蜂窝结构件移动扫描检测,有效地解决了上述问题,同时使用分辨率测试卡,保障了系统的分辨力,获得了满意结果。

**关键词:**蜂窝结构;芯格影像;实时成像技术;测试卡

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2013)04-0053-04

## The Real-time Imaging Detection Technology of Brazing Metal Honeycomb

WANG Bing-Yang, ZHOU Bing-Ru, YAN Feng-Feng

(Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

**Abstract:** This paper introduces the real-time imaging detection technology during the manufacturing process of brazing metal honeycomb. Traditional radiography is limited by the diameter-ray beam angle and the effective areas of Tran-illumination are small, hence the detection of large-scale honeycomb structure are less efficient; Meanwhile, the imaging deformation of the core grid due to the thickness change of the work piece might occur. The paper uses the real-time imaging technology to dynamically scan the honeycomb structure and to detect defects, and it is proven effective to solve the above problems. At the same time, a satisfactory result was obtained based on the system resolution provided by the resolution test meter.

**Keywords:** Honeycomb structure; Core grid image; Real-time imaging technology; Test meter

随着航空制造技术的不断提高,金属蜂窝结构件在新型飞机的研制中应用得越来越多,许多航空公司已在飞机的机翼及发动机制造中应用到了该型零件,因此其生产制造及后期使用过程中的无损检测就十分重要。复合材料蜂窝结构的检测中,实时成像技术的应用已很成熟<sup>[1-2]</sup>,然而对于厚度成坡度状的钎焊金属蜂窝结构的检测,实时成像检测应用的实例还不是很多。在飞机内外侧钎焊金属蜂窝结构件的射线检测中,笔者应用实时成像技术有效地检测出了蜂窝结构中的夹芯节点开焊、芯格鼓胀、断裂、芯格壁存在孔洞及钎料过多等缺陷,为该型工件的工艺优化提供了有力依据。

## 1 实时成像技术原理

实时射线成像是一种应用穿透性射线来产生图像的无损检测方法,它所产生的图像在射线透照的同时即可被观察到<sup>[3]</sup>。实时成像检测过程中,射线源发出的 X 射线透过待检测工件后,被射线转换器(图像增强器)接收,将其转化为荧光,发射的荧光被光电层接收,并将荧光能量转换为电子发射。发射的电子在聚焦电极的高压下被聚焦和加速,高速撞击到输出屏上。输出屏将电子能量转换为荧光发射,成了图像增强器输出屏上的可见光图像,经光学系统(附加在图像增强器中)后由摄像机拾取,将信号转换为视频信号,再 A/D 转换后送入图像处理单元进行各种图像处理,以改善图像质量,处理后的图像送入图像显示单元显示<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2012-04-10

作者简介: 王丙阳(1985—),男,助理工程师,主要从事无损检测技术的应用研究工作。

## 2 检测系统

### 2.1 设备

采用的 X 射线机是德国 YXLON MG161 型,焦点尺寸 0.4 mm;射线转换器为 YXLON XRS 232 CCD 型图像增强器。

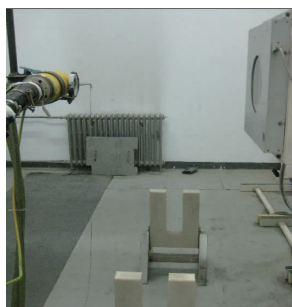


图1 实验室内的  
实时成像系统

成像系统见图1。工作模式为:曝光时间无穷大,管电流随输出电压做负载特性曲线变化。机械移动装置实现射线机、图像增强器与工件三者之间的相对移动,机械装置移动速度为 16.2 mm/s。

#### 2.1.1 系统空间分辨率的测试

采用 YXLON international 9421-769-00091 线性测试卡测定实时成像系统的空间分辨率。该测试卡不同于国内其他类型的测试卡,它共有 12 个线对组,间距 3 mm,每组有 5 条栅条,见图2。线对组栅条的宽度与线对组对应的关系见表1。

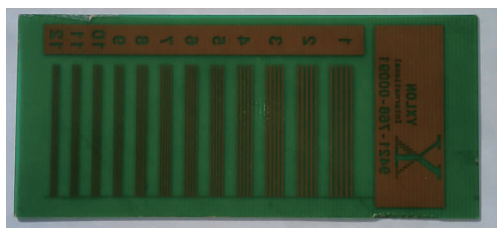


图2 德国 YXLON international 9421-769-00091  
线性测试卡

表1 线性测试卡线对数标号与系统分辨率的转换关系

标号	分辨率/ (lp · mm <sup>-1</sup> )	栅条宽 度/mm	标号	分辨率/ (lp · mm <sup>-1</sup> )	栅条宽 度/mm
1	1.00	0.500	7	1.88	0.266
2	1.11	0.450	8	2.09	0.239
3	1.23	0.407	9	2.32	0.216
4	1.37	0.365	10	2.58	0.194
5	1.52	0.329	11	2.87	0.174
6	1.69	0.296	12	3.19	0.157

实时成像系统空间分辨率测试时,将测试卡成 45°角贴在图像增强器输入屏的中心区域(避免受到扫描线的干扰),射线机的管头焦点至图像增强器输入屏的距离不小于 700 mm,从 15 kV 起逐步提高管电压(最大管电压不大于 40 kV),直至获得灰度

合适的图像。经测试,管电压为 37 kV 时,图像灰度、对比度合适,经帧积分处理后可清晰发现测试卡第 9 号线对。由表 1 可知:系统分辨率为 2.32 lp/mm。根据 GB 17925—1999《气瓶对接焊缝 X 射线实时成像检测》附录中 X 射线实时成像系统的分辨率和系统固有不清晰度的测试方法可知系统的固有不清晰度  $U_s = 0.194$  mm。

### 2.2 最佳放大倍数及最小缺陷的检出

系统不清晰度主要分为固有不清晰度  $U_s$ ,几何不清晰度  $U_g$  及动态不清晰度。固有不清晰度受荧光屏影响,是个固定值,无法最优化。荧光屏随射线机一起移动,相对于射线机,荧光屏处于静止状态,且机械装置的扫查速度固定,这样动态不清晰度也可认为是固定值,在此暂不考虑。

实时成像中屏幕上显示的检测图像由不同灰度等级的像素组成,像素比胶片的卤化颗粒大得多,因而实时成像检验中,一般采用放大透照布置,图像放大,缺陷的尺寸也被放大,图像的清晰度增大。然而随着图像放大倍数的增加,几何不清晰度也将增大,图像的清晰度减小,这就决定了实时成像存在最佳放大倍数  $M_{opt}$ :

$$M_{opt} = 1 + \left( \frac{U_s}{d} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式中: $U_s$  为系统固有不清晰度,0.19 mm; $d$  为焦点尺寸,0.4 mm。

据式(1)可知本系统的最佳放大倍数为: $M_{opt} = 1.33$ 。

最小可识别的缺陷大小  $q$  为:

$$q = \frac{U_s}{M_{opt}^{\frac{2}{3}}} \quad (2)$$

$$q \approx 0.16 \text{ mm}$$

射线源至被测件的距离可按式(3)计算:

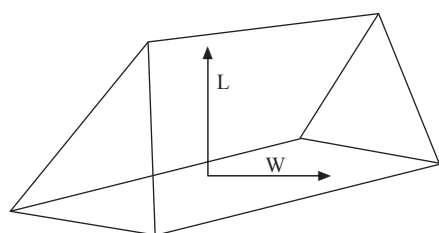
$$f = \frac{T+J}{M_{opt}-1} \quad (3)$$

式中: $f$  为射线源至被检工件侧的距离; $T$  为工件的厚度; $J$  为被检工件至图像增强器的距离。

由式(3)可知,只要确定焦距  $F$ ,  $f$  的距离即可确定,文中  $F = 1\,000$  mm。

## 3 蜂窝的钎焊工艺及检测难点

钎焊是指在真空环境中,在一定的温度和压力下,利用熔化的填充金属(钎料)将加热的固体金属连接在一起。焊接过程中固体金属不发生熔化,其结合是依靠被焊金属与钎料间的原子扩散而成。



(a) 几何形状示意图



(b) 内部蜂窝结构

图3 待检测工件示意图

待检工件示意图见图3,其成形工艺如下:沿L,W方向将蜂窝固定—利用机加工将蜂窝结构加工成具有一定的坡度—将钎料刷涂在蜂窝格上一加盖两块蒙皮板后加压—送入真空炉。

飞机内外侧钎焊金属蜂窝结构的实时成像检测时,须注意两方面问题:

(1) 合适的透照区域 蜂窝实时成像检测中,有效区域定义依据蜂窝芯格影像变形的程度,即控制透照区域边缘的芯格高度的投影与芯格宽度的投影(六边形两对边的距离)之比。比值越大芯格影像的变形程度越大<sup>[4]</sup>。在薄的部位,芯格高度与芯格宽度的比值很小,两者的投影比值相对很小,有效检测区域大;厚的部位正好相反。这样飞机内外侧的实时成像检测过程中,有效检测区域不断变化。

由于蜂窝芯格宽度的大小不变,芯格高度的投影与芯格宽度的投影临界值可定,从而射线束与芯格壁的相交点,即 $l$ 芯格影像不变形的人射点高度临界值可确定。图4为工件透照模拟示意图。

$$\begin{cases} g_2 = \tan\theta(g_1 + h_1) \\ \frac{h_1 + h_0 + m}{h_1 + h_0 + g_1} = \frac{h_2}{g_2} \\ x = \frac{g_2 - h_2}{\sin\theta} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $m$ 为无蜂窝区域; $\theta$ 为内外侧的夹角角度; $h_0$ 为 $h_1$ 之前有效区域长度; $l$ 为芯格影像不变形的人射点高度; $h_1$ 为第2个有效区域的直角边长度; $h_2$ 为第2个有效区域高度; $g_1$ 为第3个有效区域的直

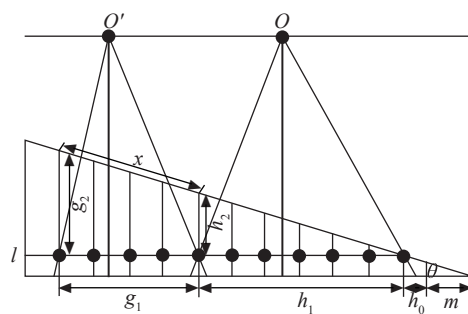


图4 工件透照模拟图

角边长度; $g_2$ 为第3个有效区域高度; $x$ 为第3个有效区域宽度。

$$g_2 = \frac{\tan\theta h_0 h_2}{\tan\theta(h_1 + h_0) - h_2} \quad (5)$$

$$\text{得 } x = \frac{g_2 - h_2}{\sin\theta} = \frac{h_0 h_2}{\sin\theta(h_1 + h_0) - h_2} - \frac{h_2}{\sin\theta} \quad (6)$$

式(6)给出了金属蜂窝检测的有效区域宽度。但由于该式的推导建立在已知量的基础上。检测前需给出 $h_1$ ,  $h_0$ 及 $m$ 的有效长度。

文中主要是通过简单计算及前期扫查确定已知检测区域,如简单计算可确定 $h_0$ 的区域,前期扫查可快速得到 $h_1$ 的长度。针对已知区域,再通过式(6)的计算,制作了一个简易检测工装,用于后续扫查过程中有效检测区域的确定和缺陷位置的定位。工装的制作主要是将一大块透明塑料薄膜切割成与内外侧同等大小,根据式(6)计算好的检测区域,贴铅字标记:

$$\begin{bmatrix} 11, & 12, & 13, & 14, & 15, & 16 \\ 21, & 22, & 23, & 24, & 25, & 26 \\ 31, & 32, & 33, & 34, & 35, & 36 \\ 41, & 42, & 43, & 44, & 45, & 46 \\ 51, & 52, & 53, & 54, & 55, & 56 \\ 61, & 62, & 63, & 64, & 65, & 66 \end{bmatrix} \quad (7)$$

工装示意图见图5。

(2) 内外侧成坡度变化,蜂窝壁高不断增大(图3(a))。但由于蒙皮板的厚度不变,检测过程中,调

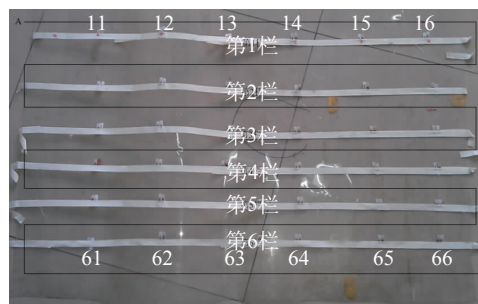
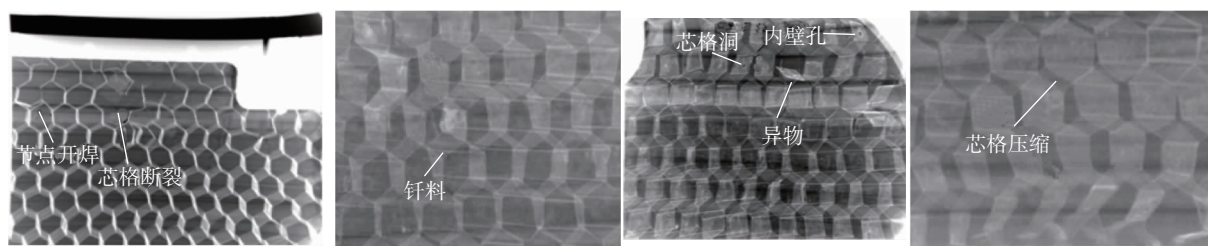


图5 缺陷定位的工装





(a) 节点开焊及芯格断裂

(b) 钎料过多

(c) 芯格内壁孔洞及异物

(d) 芯格压缩

图6 钎焊金属蜂窝几种常见缺陷成像检测结果

整管电压,得到灰度最合适的图像后,就不需再更改电压。实际检测过程中,为使蜂窝芯格与蒙皮板间的影像有一个合适的对比度,从薄侧向厚侧过渡过程中需不断微调管电压。

## 4 实时成像检测

### 4.1 检测过程

蒙皮板厚约 2 mm,笔者以管电压 56 kV、管电流 3.5 mA 的参数沿 A 至 B 的路径扫查工件。从图 4 可看出随着蜂窝厚度的增加,芯格影像变形程度大,有效检测区域不断缩小。扫查过程中微调透照电压直至图像具有足够的灰度及对比度。

### 4.2 检测结果

经过检测,发现待检测工件存在钎料过多、芯格断裂、芯格压缩、芯格坍塌、节点开焊、芯格壁存在孔洞及异物等缺陷,见图 6。

## 5 结论

从检测结果可知,实时成像技术在钎焊金属蜂窝结构件的无损检测中具有很大的优势。主要体现在:

- (1) 能够直观,快速地实现工件结构上的检测。
- (2) 检测灵敏度高,能够发现 0.16 mm 的缺陷。
- (3) 省去了胶片及显影液、定影液的应用,提高了经济效益。
- (4) 存储方便,一个工件完整的检测过程大概需 15 min,存储量约 100 M。500 G 的硬盘可存储约 5 000 个工件检测的数据。

但是基于射线检测的局限性,实时成像检测无法实现蜂窝结构与蒙皮钎焊质量的检测<sup>[5-7]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 张咏红,张为民.典型复合材料损伤—损伤实时成像检测图谱的解释[J].机械工程与自动化,2009,152(1):

109—111

- [2] 张咏红,张为民.复合材料 X 射线实时成像检测关键参数分析[J].现代机械,2008(5):81—84.
- [3] 美国无损检测学会编.美国无损检测手册·射线卷[M].美国无损检测手册译审委员会译.上海:世界图书出版公司,1992.
- [4] 郑世才.射线检测(国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材)[M].北京:机械工业出版社,2004,06.
- [5] 刘松平,陈积懋.大密度金属钎焊蜂窝构件超声检测与缺陷识别技术的研究[J].无损检测,1995,17(10):271—273.
- [6] 石剑,吕健.金属蜂窝真空钎焊件的超声波检测[J].无损检测,2007,29(7):392—395.
- [7] 刚铁,李伟力.扩散焊接头质量检测的研究现状[J].焊接,2000(5):6—10.

### 欢迎订阅《无损检测》纸质/电子期刊

《无损检测》杂志定价每期 10 元,全年 120 元,请到当地邮局办理订阅手续,邮发代号:4-237,也可直接与本刊发行部联系订阅。另外为倡导环保理念,节约纸张,本刊同时推出电子期刊,采用 PDF 格式用 E-mail 形式发送,读者保存方便不占空间,可方便打印某篇文章或某一页;订阅费用低,全年订阅比邮购费用低一半以上,全年 50 元,半年 30 元,且比邮局发行快 10 天左右。

如需订阅请登陆 [www.mat-test.com](http://www.mat-test.com) 网站填写信息,并把订阅款项打入指定银行帐户或通过邮局汇款,收到款项后我们将及时发送电子期刊。

地址:上海市邯郸路 99 号;邮编:200437

电话:021-65527634,65556775-311

联系人:王敏。