

# 铝面板泡沫夹芯结构材料脱粘缺陷的 超声脉冲多次反射法检测

肖轲迪 吴君豪 罗明 支凡 张颖

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

**文 摘** 针对铝面板泡沫夹芯结构材料脱粘缺陷的检测问题,开展了超声脉冲多次反射法检测技术研究。分析了超声脉冲多次反射法的检测原理,制作了人工模拟缺陷试样,进行了自动检测C扫描成像,通过灰度点数量统计方法分析和优化了缺陷识别的结果。研究表明,超声脉冲多次反射法能有效检出铝面板泡沫夹芯结构材料中的脱粘缺陷,为材料研制和质量评估提供依据。

**关键词** 超声脉冲多次反射法,铝面板泡沫夹芯结构材料,脱粘缺陷,C扫描成像

中图分类号: TB553

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.03.010

## Debond Defect Detection of Foam Sandwich Structure Material With Aluminum Panel by Ultrasonic Multiple Echo-pulse Method

XIAO Kedi WU Junhao LUO Ming ZHI Fan ZHANG Ying

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** To detect the debond defects in the foam sandwich structure material with aluminum panel, ultrasonic multiple echo-pulse method was performed. The method principle was analyzed, the artificial defect samples were made, and the automatic C-scan imaging detection was performed. The defect recognition results were analyzed by statistic calculation of the scan image gray pixel numbers. The result shows that the ultrasonic multiple echo-pulse method is effective on debond defect detection of the foam sandwich structure material with aluminum panel and provides basis for material research and evaluation.

**Key words** Ultrasonic multiple echo-pulse method, Foam sandwich structure material, Debond defect, C-scan imaging

### 0 引言

铝面板泡沫夹芯结构材料具有良好的力学性能和隔热性能,被应用在运载火箭舱段、飞机机翼等产品部件上<sup>[1-3]</sup>。随着应用的逐步推进,对铝面板泡沫夹芯结构材料脱粘缺陷无损检测的灵敏度和可靠性提出了更高的要求。夹芯结构材料脱粘缺陷检测的主要方法有敲击法<sup>[4]</sup>、超声喷水穿透法<sup>[5-6]</sup>和超声脉冲多次反射法<sup>[7-8]</sup>。敲击法在检测包含较厚面板的夹芯结构材料时灵敏度较低,而超声喷水穿透法在检测包含较大声衰减的泡沫材料时灵敏度亦较低。超声脉冲多次反射法不需穿透泡沫材料,受面板厚

度的影响较小,可应用于铝面板泡沫夹芯结构材料脱粘缺陷的检测。

本文将超声脉冲多次反射法应用于铝面板泡沫夹芯结构材料脱粘缺陷检测,分析了超声脉冲多次反射法的检测原理,制作了人工模拟缺陷试样,使用超声自动检测系统得到了C扫描图像,通过灰度点数量统计方法讨论了不同缺陷图像差异的原因,并进行了缺陷识别方面的分析和优化。

### 1 超声脉冲多次反射法检测原理

在铝面板泡沫夹芯结构材料超声脉冲多次反射法检测中,声波从铝面板表面入射,声波传播路径示

收稿日期:2022-06-14

第一作者简介:肖轲迪,1991年出生,博士,高级工程师,主要从事超声无损检测研究。E-mail: kedixiao@sina.cn

意图见图1。入射声波在两种不同材料界面处发生反射,反射率 $r=(Z_2-Z_1)/(Z_2+Z_1)$ ,其中 $Z_1$ 和 $Z_2$ 分别是界面两侧材料的声阻抗。对粘接完好处而言[图1(a)],声波的反射界面是铝面板与胶膜界面,铝声阻抗 $Z_{铝}\approx 1.7\times 10^6\text{ g/cm}^2\cdot\text{s}$ ,胶膜声阻抗 $Z_{胶}\approx 3\times 10^5\text{ g/cm}^2\cdot\text{s}$ ,反射率约为 $r_{好}\approx 0.7$ 。对脱粘缺陷处而言[图1(b)],声波的反射界面是铝面板与空气层界面,空气层声阻抗 $Z_{空}\approx 40\text{ g/cm}^2\cdot\text{s}$ ,反射率约为 $r_{缺}\approx 1$ 。因此,第1次反射波在粘接完好处和脱粘缺陷处的声压比 $w_1$ 约为反射率之比 $w_1\approx r_{好}/r_{缺}\approx 0.7$ 。第1次反射波到达入射面后在入射面反射,并继续重复上述过程在铝面板和胶膜或空气层界面反射,形成第2次反射波。该过程循环往复,形成更多次反射波。第 $n$ 次反射波在粘接完好处和脱粘缺陷处的声压比 $w_n$ 约为第1次反射波 $w_1$ 的 $n$ 次方 $w_n\approx w_1^n$ 。以第3次反射波为例,声压比 $w_3\approx 0.34$ ,粘接完好处和脱粘缺陷处超声检测仪显示的反射波的幅度(以下简称:反射波幅度)差异相较于第1次反射波更大,对比更明显。反射波次数增加对粘接完好处和脱粘缺陷处反射波幅度差异起到了放大作用,使缺陷更易于检出。因此,在超声脉冲多次反射法中,利用较多次数的反射波幅度差异可实现铝面板泡沫夹芯结构材料脱粘缺陷的检测。

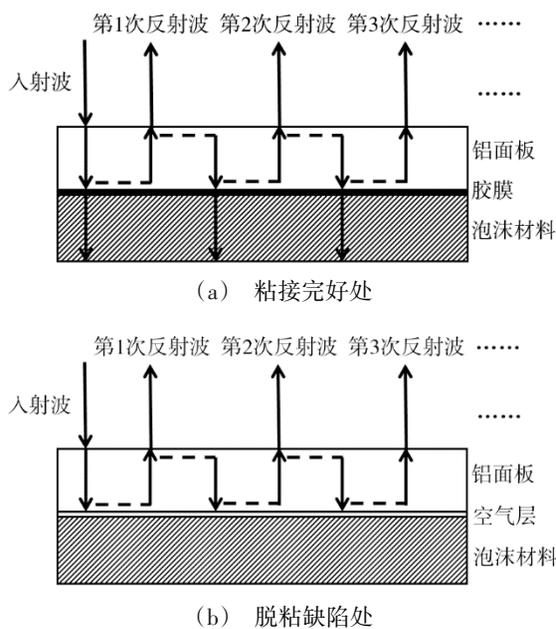


图1 多次反射波声波传播路径示意图

Fig. 1 Diagram of acoustic wave propagation paths for multiple echo-pulses

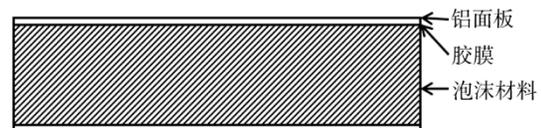
## 2 检测试验方法

### 2.1 人工模拟缺陷试样制作

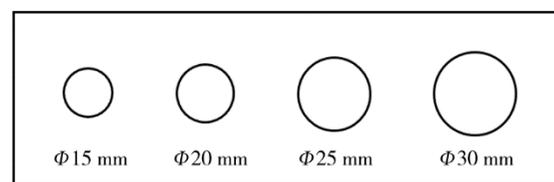
铝面板泡沫夹芯结构材料由上层、下层铝面板与中心泡沫材料胶接构成[图2(a)].组装成型时,分别在上、下面板与泡沫之间置入胶膜,待加压加热

固化后成为泡沫夹芯结构材料。人工模拟缺陷试样(以下简称试样)是在材料组装成型时根据设计的位置和大小通过人为制作缺陷而得到的包含缺陷的材料平板,共制作了1#和2#共2块试样,试样上层、下层铝面板厚度均为1.5 mm,泡沫夹芯层厚度30 mm。

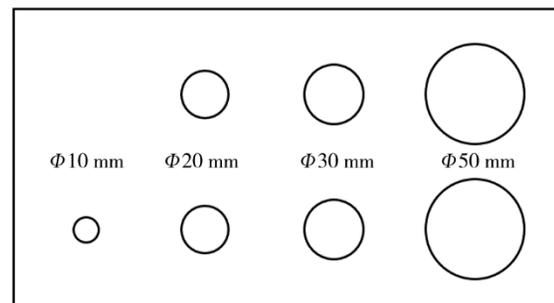
1#试样示意图见图2(b),面积240 mm×80 mm,试样上制作了4个模拟脱粘缺陷,缺陷直径从小至大依次为 $\Phi 15\text{ mm}$ 、 $\Phi 20\text{ mm}$ 、 $\Phi 25\text{ mm}$ 、 $\Phi 30\text{ mm}$ 。试样制作时,将模拟脱粘缺陷位置的胶膜剪去,同时裁剪对应尺寸的双层聚四氟乙烯薄膜圆片置入缺陷位置,最后对试样组装固化。该试样制作方法为夹芯结构类材料超声检测试样的传统制作方法,已被多种检测标准所采用。但是,对铝面板泡沫夹芯结构材料中的胶膜来说,为使胶浸入泡沫材料,其流动性比一般蜂窝夹层结构材料中的胶膜好。然而在检测中,胶膜较好的流动性可能会改变缺陷位置铝面板内表面的表面状态,对多次反射波幅度产生影响。为了模拟这种情况,制作了2#试样[图2(c)],面积400 mm×300 mm,预制了2行共7个模拟脱粘缺陷,位置相对的上下两个缺陷为相同尺寸,缺陷直径自小至大依次为 $\Phi 10\text{ mm}$ 、 $\Phi 20\text{ mm}$ 、 $\Phi 30\text{ mm}$ 、 $\Phi 50\text{ mm}$ 。试样组装和制作时,仅把模拟脱粘缺陷位置的胶膜剪去,不置入聚四氟乙烯薄膜圆片。



(a) 铝面板泡沫夹芯结构材料示意图



(b) 1#试样



(c) 2#试样

图2 人工模拟缺陷试样的结构和尺寸

Fig. 2 Structures and sizes of artificial defects in samples

## 2.2 超声自动检测系统

超声自动检测系统的主要组成部分包括机械扫查装置、探头、超声检测仪和C扫描成像软件。机械扫查装置包含X和Y两个运动轴,这两个运动轴能使探头在XY平面上的检测区域内自动逐行扫查,扫查间距和采样间距均为0.5 mm。经探头选择试验发现,在探头类型方面,聚焦探头的横向分辨力和C扫描成像分辨率均优于平探头;在探头频率方面,频率越高,相邻各次反射波重叠越小,越宜于反射波的选取和成像。成像效果最好的试验所用的探头是喷水聚焦探头,频率25 MHz,晶片直径10 mm,焦距50 mm,焦斑直径2 mm。

超声检测仪采用单探头反射法工作模式。检测时打开超声检测仪的跟踪闸门功能,此功能中成像闸门与跟踪闸门的相对位置保持不变,适用于选取入射界面之后,相对入射界面固定声程处的反射波。跟踪闸门设置为跟踪铝面板外表面反射波,成像闸门设置为跟踪闸门之后的第3次反射波。铝面板泡沫夹芯结构材料多次反射波波形如图3所示,根据超声脉冲多次反射法原理,次数越高的反射波在超声检测仪上显示的幅度差异越大,但是信噪比会降低,

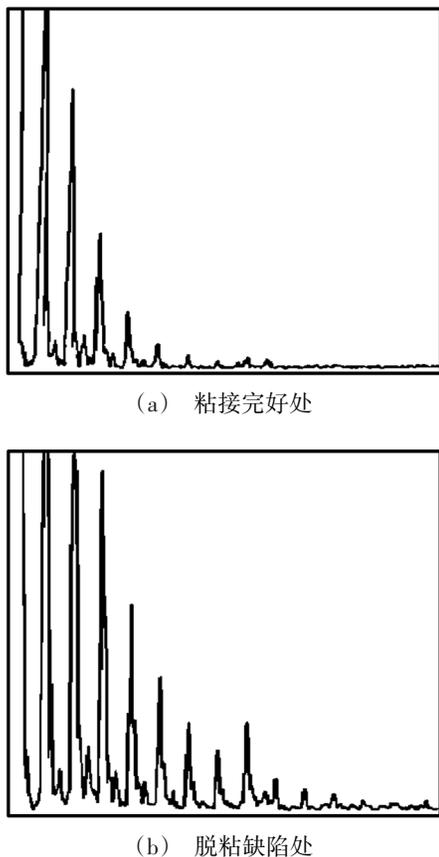


图3 铝面板泡沫夹芯结构材料多次反射波波形  
Fig. 3 Multiple echo-pulse waveform on foam sandwich structure with aluminum panel

经试验发现选取第3次反射波的检测效果最好。

C扫描成像中,通过计算机同时读取来自超声检测仪的波幅度信息和来自机械扫查装置的探头位置信息,在颜色表上找到波幅度对应的颜色并根据位置信息将该颜色显示在图像上对应的位置点。最常用的颜色表为256阶灰度表,表中将波幅度线性映射到0~255内的整数,每个整数代表一个灰度值。颜色点随着探头位置的移动铺满图像全部区域,最后形成整幅灰度或彩色的C扫描图像。

## 3 结果与讨论

### 3.1 人工模拟缺陷试样C扫描图像

一般来说,被检件的大部分区域为完好区,少数区域为缺陷区。对应的超声C扫描图像是较为均匀的灰色图上分布了若干浅色的小区域。缺陷识别时,认为若干浅色的小区域为缺陷区域。人工模拟缺陷试样C扫描图像见图4。图中将超声检测仪闸门内反射波幅度线性映射到256阶灰度表中,反射波幅度100%时为白色,反射波幅度0时为黑色,颜色越深表示幅度越低。在试样的缺陷区,声波的反射界面是铝面板与空气层界面,反射率约为1,反射波幅度较高,颜色趋近于白色。在试样的完好区,声波的反射界面是铝面板与胶膜界面,反射率较小,反射波幅度较低,颜色趋近于深色。

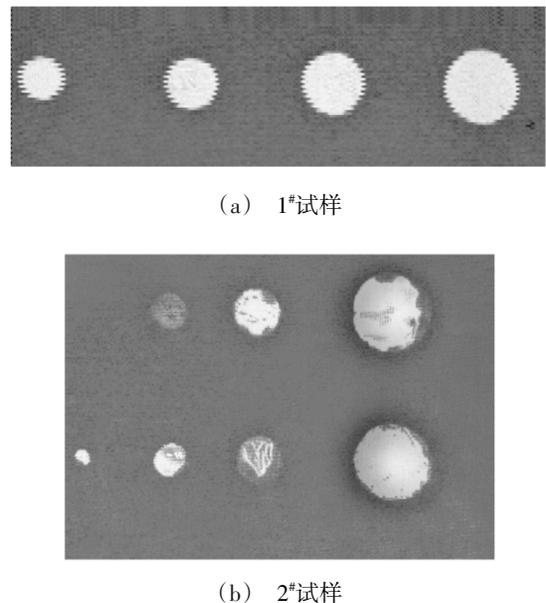


图4 试样C扫描图像

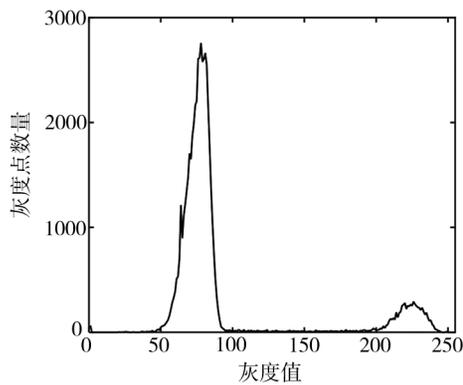
Fig. 4 Sample C-scan images

1#试样[图4(a)],扫描图像中各个缺陷区均显示白色,而完好区均显示深色,缺陷位置和边界明显,易于识别。2#试样[图4(b)],缺陷区相较1#试样更不明显,其中第1行 $\Phi 30$  mm和 $\Phi 50$  mm、第2行 $\Phi 20$  mm缺陷边界模糊,同时第1行 $\Phi 20$  mm和第2行 $\Phi 30$  mm缺

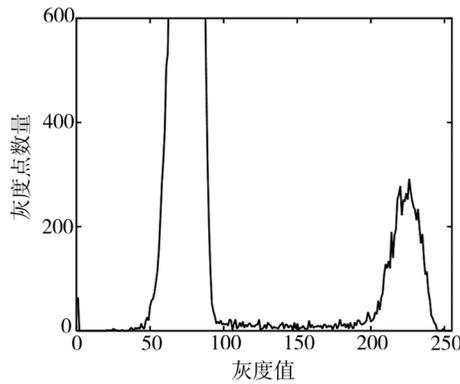
陷颜色整体发暗。这是由于没有聚四氟乙烯薄膜的置入,材料固化成型过程中部分胶液进入缺陷制作位置,改变了铝面板的表面状态,使声波在该界面的反射率介于铝面板与空气层界面的反射率和铝面板与胶膜界面的反射率之间,反射波幅度亦介于两者之间,使缺陷对比度下降,增加了缺陷识别的难度。

### 3.2 1#试样C扫描图像分析

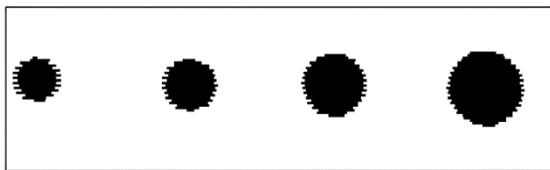
使用灰度点数量统计方式分析C扫描图像,统计中以0~255灰度值作为横轴,各个灰度值在图像中的灰度点数量作为纵轴生成统计图。对1#试样C扫描图像图4(a)做灰度点数量统计,结果见图5(a),纵轴放大图见图5(b)。



(a) 灰度点数量统计图



(b) 纵轴放大图



(c) 缺陷判定结果

图5 1#试样C扫描图像灰度点数量统计和缺陷判定结果

Fig. 5 Statistic of gray pixel numbers and defect recognition result of 1# sample C-scan image

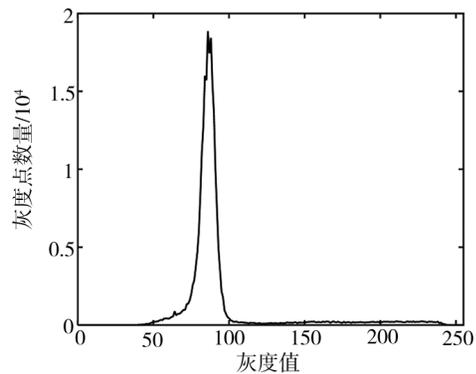
统计图中包含了2个灰度点数量分布峰,其中一个位于左侧的表示深色区域的分布峰,灰度值集中在50~100区间;另一个是位于右侧的表示浅色区

域分布峰,灰度值集中在200至250区间。结合C扫描图像可以发现,C扫描图像中表示完好区的灰度点为大多数,它们的颜色较深,灰度值近似相等,在统计图中对应于左侧的分布峰。同理,C扫描图像中表示缺陷区的灰度点数量较少,它们的颜色较浅,在统计图中对应于右侧的分布峰。分布峰的宽度与材料不均匀性相关,高度与检测面积相关。

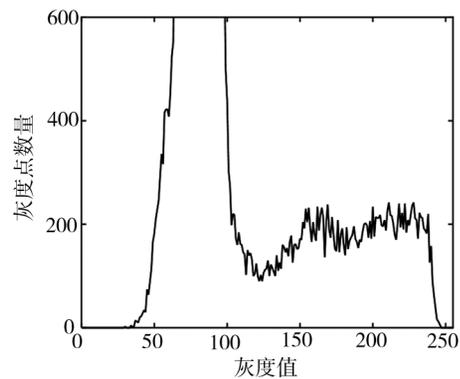
对于1#试样来说,表示完好区的分布峰与表示缺陷区的分布峰相互分开,两个分布峰之间几乎没有灰度点分布。此时,由统计特征出发,判伤灰度阈值可以选择完好区分布峰和缺陷区分布峰之间的任意灰度值,将灰度值大于判伤灰度阈值的区域作为缺陷区域,缺陷识别结果见图5(c)。从图中可见各个缺陷清晰显示,缺陷识别结果较好。

### 3.3 2#试样C扫描图像分析

对2#试样C扫描图像图4(b)做灰度点数量统计,结果见图6(a),纵轴放大图见图6(b)。统计图有别于1#试样的2个明显的分布峰,2#试样的统计图中仅包含1个位于左侧的分布峰,和位于右侧灰度点数量较少的连续分布区间。左侧分布峰灰度值集中在50~100区间,代表了完好区。由纵轴放大图6(b)可见,右侧连续分布区间灰度值遍布100~250,其中灰



(a) 灰度点数量统计图



(b) 纵轴放大图

图6 2#试样C扫描图像灰度点数量统计

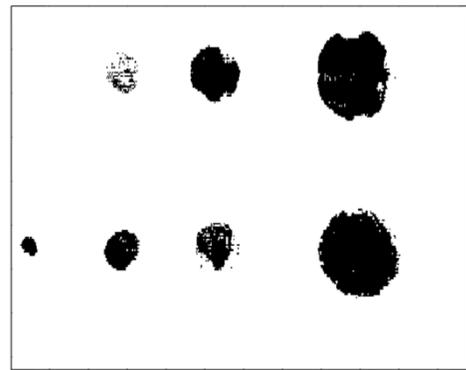
Fig. 6 Statistic of gray pixel numbers of 2# sample C-scan image

度点数量在 150~250 区域较为集中,各个灰度值对应的灰度点数量在 200 个左右,代表了缺陷区。与 1# 试样灰度值统计图不同的是,2# 试样代表缺陷区的不是分布峰而是连续分布区间,并且该区间与代表完好区的分布峰连接在一起,无明显统计特征辅助选取探伤灰度阈值,为缺陷识别带来了困难。

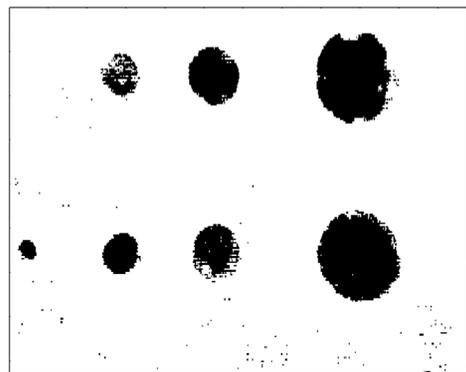
针对 2# 试样,分析和讨论判伤灰度阈值选择对缺陷识别的影响。从统计图 6(b) 中可知,完好区灰度值的集中范围与缺陷区灰度值的集中范围之间存在数值低点,从图中可估计为 120,该低点可作为划分完好区与缺陷区之间的判伤灰度阈值。为此,将扫描图像中灰度值大于 120 的区域认为是缺陷区域并标记为黑色,结果见图 7(a)。由结果图中可见,黑色标记的区域小于缺陷区域(如第 1 行第 2 个、第 2 行第 3 个),同时缺陷边缘存在缺口(如第 1 行第 3 个)。造成缺陷面积被低估的原因在于,统计图中灰度值 120 并非严格意义上的分割完好区与缺陷区的灰度值,而是完好点(位于完好区的灰度点)数量分布区间右端与缺陷点(位于缺陷区的灰度点)数量分布区间左端在灰度值 120 处发生交叉,交叉点左侧缺陷点数量逐渐减少而完好点数量逐渐增多,交叉点右侧完好点数量逐渐减少而缺陷点数量逐渐增多。因此,将灰度值 120 选择为判伤灰度阈值,就将分布于灰度值 120 左侧的缺陷点认为是完好点,造成了缺陷尺寸的低估和缺陷边界的缺口。为包含分布于灰度值 120 左侧的缺陷点,必须将判伤灰度阈值左移。

将扫描图像中灰度值大于 100 的区域认为是缺陷区域并标记为黑色,结果见图 7(b)。相较于图 7(a),各个缺陷显示更加明显,边缘更加清晰。其中,第 1 行第 2 个缺陷更加明显,第 1 行第 3 个缺陷边缘完好,不存在缺口,第 2 行第 3 个缺陷更明显,其他缺陷边缘较图 7(a)更圆滑。但是,结果图下部出现了若干孤立的干扰点。这是因为判伤灰度阈值的左移,在将更多缺陷点包含在缺陷区域的同时,也将少部分完好点认为成了缺陷点。由于图 7(b)被误认为是缺陷的干扰点几乎均匀分布在完好区域之中,无聚集现象,对应的面积很小,可通过与图 7(a) 比较进行识别和剔除。将扫描图像中灰度值大于 95 的区域认为是缺陷区域并标记为黑色,结果见图 7(c)。相较于图 7(b),各缺陷区域及边缘基本相同,但是干扰点数量大幅增加,存在干扰缺陷识别的可能。因此,判伤灰度阈值取 100 得到的图 7(b) 缺陷识别效果最好。

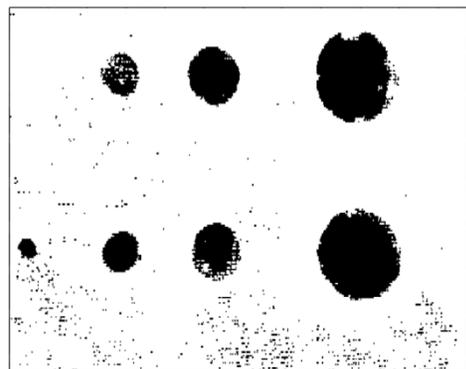
综合 1# 和 2# 试样 C 扫描图像的分析,从灰度点数量统计图出发,若表示完好区的分布峰与表示缺陷区的分布峰相互分开,则判伤灰度阈值可选择两分



(a) 灰度值大于 120 的区域



(b) 灰度值大于 100 的区域



(c) 灰度值大于 95 的区域

图 7 不同灰度阈值的缺陷识别结果图

Fig. 7 Defect recognition results by different gray thresholds

布峰之间的值。若表示完好区的分布峰与表示缺陷区的分布峰存在交叠,则可通过移动法选择判伤灰度阈值。首先选择完好区与缺陷区对应分布范围之间的数值低点对应灰度值作为判伤灰度阈值。若缺陷显示效果欠佳,可将判伤灰度阈值向完好区分布峰方向适当移动,使缺陷区域及边缘更清晰,由此而产生的干扰点可通过相互对比予以识别和剔除。但是,若判伤灰度阈值移动距离过大,会产生过多的干扰点影响缺陷识别,此时应缩小移动的距离。

#### 4 结论

(1) 检测试验表明超声脉冲多次反射法适用于

铝面板泡沫夹芯结构材料脱粘缺陷检测。检测时将超声波从铝面板表面入射,利用超声波在铝面板中的多次往复反射,放大粘接完好处和脱粘缺陷处反射波幅度的差异,提高脱粘缺陷的检测效果。

(2)在试验研究中,利用超声自动检测系统对人工模拟缺陷试样进行扫查检测,得到C扫描图像。试样上的人工缺陷采用不同方式制作,首先将缺陷制作位置的胶膜剪去,然后按传统制作方法置入对应尺寸的双层聚四氟乙烯薄膜圆片,或不置入薄膜圆片,模拟胶膜发生流动的情况。

(3)灰度点数量统计方式适用于扫描图像缺陷区域判定。在理想情况下,统计得出的完好区分布峰和缺陷区分布峰相互分开,判伤灰度阈值易于确定。在胶膜发生流动的情况下,完好区分布峰和缺陷区分布峰存在重叠,应根据缺陷轮廓和干扰点数量选择判伤灰度阈值,或通过后期处理算法剔除干扰点,得到缺陷判定结果。

#### 参考文献

[1] 颜鸿斌,孙红卫,凌英,蒋文革,付求舟. 树脂基复合材料/泡沫塑料夹层结构成型技术研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2004, 34(1):12-15.

YAN H, SUN H, LING Y, et al. Progress of Molding Technology of Resin-matrix Composite/foam Plastic Sandwich [J]. Aerospace Materials and Technology, 2004, 34 (1) : 12-15.

[2] 贾欲明,韩全民,李巧,陈顺强. 泡沫夹层结构在飞机次承力结构中的应用[J]. 航空制造技术, 2009(Z1):8-12.

JIA Y, HAN Q, LI Q, et al. Application of Foam Sandwich Structure in Aircraft Secondary Load-Carrying Structure [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(Z1):8-12.

[3] 邢亚娟,孙波,高坤,王振河,杨毅. 航天飞行器热防护系统及防热材料研究现状[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(4):9-15.

XING Y, SUN B, GAO K, et al. Research Status of Thermal Protection System and Thermal Protection Materials for Aerospace Vehicles [J]. Aerospace Materials and Technology, 2018, 48(4):9-15.

[4] 肖轲迪,张颖,吴君豪,罗明,吴时红. 蜂窝夹层结构脱粘缺陷电磁锤敲击检测模型及持力时间分析[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(5): 70-75.

XIAO K, ZHANG Y, WU J, et al. Mechanical model and contact time analysis of tap test on honeycomb sandwich structures [J]. Aerospace Materials and Technology, 2020, 50 (5): 70-75.

[5] 周正干,胡逸雯,章宽爽. 变厚度多边形蜂窝结构的超声C扫描检测方法[J]. 应用声学, 2018, 37(1): 28-33.

ZHOU Z, HU Y, ZHANG K, et al. Ultrasonic c-scan method of variable thickness polygonal honeycomb structure [J]. Applied Acoustics, 2018, 37(1): 28-33.

[6] 史俊伟,刘松平,程文礼. 复合材料蜂窝夹层结构制件的超声可视化无损检测[J]. 无损检测, 2015, 37(3): 39-43.

SHI J, LIU S, CHENG W. Visible Ultrasonic Nondestructive Testing Methods for Composite Honeycomb Sandwich Structure [J]. Nondestructive Testing, 2015, 37(3): 39-43.

[7] 赵慧蓉. 固体火箭发动机喷管粘接界面的超声检测 [J]. 固体火箭技术, 2000, 23(2): 74-78.

ZHAO H. Ultrasonic detection of bonded interfaces for solid motor nozzles [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2000, 23(2): 74-78.

[8] 江念,王召巴,金永,陈友兴. 复合结构界面粘接质量的超声衰减法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2015, 2: 88-90.

JIANG N, WANG Z, JIN Y, et al. Research of bonding quality for composite structure using ultrasonic attenuation [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015, 2: 88-90.