



# Experimental Study on Rapid Repair of Foam Sandwich Composites for Radome with Low-velocity Impact Damage

Wang Changyue, Zhang Hongrui, Ju Su<sup>\*</sup>

College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, China

**Email address:**

1979338953@qq.com (Wang Changyue), 135853077@qq.com (Zhang Hongrui), 46163757@qq.com (Ju Su)

<sup>\*</sup>Corresponding author

**To cite this article:**

Wang Changyue, Zhang Hongrui, Ju Su. Experimental Study on Rapid Repair of Foam Sandwich Composites for Radome with Low-velocity Impact Damage. *Science Discovery*. Vol. 5, No. 4, 2017, pp. 251-256. doi: 10.11648/j.sd.20170504.12

**Received:** April 5, 2017; **Accepted:** May 12, 2017; **Published:** May 20, 2017

**Abstract:** Sandwich structure composites are commonly used in Radar radomes, the core materials mainly include honeycomb material and foam material. Impact damage is the greatest threat to this kind of structure. In this paper, low-velocity impact damage was simulated by drop hammer test, while ultrasonic phased array technique was used as NDT(Non-Destructive Testing Technology), and restored by scarf repair technique. The mechanical properties and the electromagnetic wave performance of the foam sandwich panel before and after repair were carried out comparatively. The results show that, the flexural strength can restore 112.7% of the undamaged plate, and the lateral compressive strength can restore 85.1%. The repair efficiency calculated from tests was observed to be 135% and 50.7% respectively. Besides, electro-magnetic wave permeability was improved apparently. The method for repairing the low-velocity impact damage of the foam sandwich structure can meet the requirements of the rapid repair for practical radome structure.

**Keywords:** Foam Sandwich Composites, Low-velocity Impact, Rapid Repair

---

## 天线罩用泡沫夹芯复合材料低速冲击损伤快速修复的试验研究

王长越, 张洪瑞, 鞠苏<sup>\*</sup>

航天科学与工程学院, 国防科学技术大学, 长沙, 中国

**邮箱**

1979338953@qq.com (王长越), 135853077@qq.com (张洪瑞), 46163757@qq.com (鞠苏)

**摘要:** 雷达天线罩普遍采用夹芯结构复合材料, 芯材主要是蜂窝材料和泡沫材料。冲击损伤是此类结构的最大威胁。本文通过落锤试验模拟复合材料泡沫夹芯板的低速冲击损伤, 利用超声相控阵技术进行无损检测, 挖补法修复损伤部位, 并对修复前后泡沫夹芯板的力学性能和电磁透波性能进行对比研究。结果表明, 修复后泡沫夹芯板弯曲强度能达到未损伤板的112.7%, 侧向压缩强度能达到未损伤板的85.1%, 修复效率分别达135%和50.7%; 修复后的透波性有所提升。该针对泡沫夹芯板结构低速冲击损伤的修复方法能满足实际天线罩结构快速修复的要求。

**关键词:** 泡沫夹芯复合材料, 低速冲击, 快速修复

---

## 1. 引言

夹芯结构复合材料因其轻质高强的特点，被广泛应用于航空航天领域，在雷达天线罩上的使用更是日趋成熟[1-2]。目前，雷达天线罩结构的芯材主要是蜂窝和泡沫两种。蜂窝包括Nomex芳纶蜂窝、铝蜂窝、玻璃布蜂窝等。其中，Nomex蜂窝材料的使用最为广泛。泡沫芯材主要分为聚氨酯、聚甲基丙烯酸酐亚胺(PMI)、环氧树脂等。PMI泡沫因为良好的耐温性和尺寸稳定性，尤其能承受高性能树脂基复合材料的高温高压固化工艺，可实现芯材与预浸料的共固化，所以在高性能雷达产品领域愈加受青睐[3-4]。

此类结构对冲击损伤最为敏感，高速冲击（如鸟撞）显然会对结构强度和完整性造成严重破坏，低速冲击（如检修工具的砸落、飞沙走石的碰撞）实则隐患更大，看似很低的能量，却同样能造成结构强度的大幅下降（如层间分层、纤维与芯材的界面脱粘、纤维断裂等）[5-7]。

本文以石英纤维/PMI泡沫夹芯板为研究对象，研究此类结构对低速冲击载荷的响应方式、抗冲击性及快速修复技术。本文采用落锤法对泡沫夹芯板材预制低速冲击损伤，选取挖补修复技术进行损伤修复[8-9]，通过对完好试样、损伤试样以及修复后试样进行超声C扫描以及相关力学试验，评估该结构的抗冲击性和挖补修复的效率。

## 2. 实验

### 2.1. 实验材料

B型石英玻璃纤维布010型（SiO<sub>2</sub>含量：99.98%，单位面积质量：107.27g/m<sup>2</sup>，细布）和014型（SiO<sub>2</sub>含量：99.98%，单位面积质量：141.94g/m<sup>2</sup>，粗布）；环氧树脂LT5089A，固化剂LT5089B-6，配比为100:30；芯材选用PMI泡沫（密度：0.0893g/cm<sup>3</sup>）；真空袋膜：黄色透明薄膜，65μm厚；真空辅材（密封胶条等）。

### 2.2. 材料制备

实验所用泡沫夹芯板是根据一般天线罩的典型结构A夹层制备[10]（图1），首先将泡沫芯材切削成500×500×10mm的平板，采用手糊工艺让树脂溶液均匀浸润到纤维布，之后真空袋膜密封，抽真空（真空度≥0.96），加热固化。

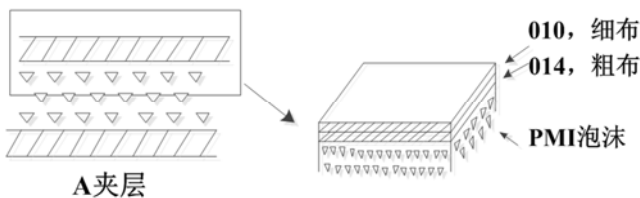


图1 A夹层结构天线罩。

### 2.3. 落锤冲击试验

参考ASTM-D7136，利用实验室条件自制简易落锤冲击试验装置，图2为装置示意图。经过反复尝试发现，以500g的金属小球（直径）从1.50m处落下，可将试样砸出

明显凹坑，且压缩强度和弯曲强度有明显下降。经计算，冲击能量为7.35J（忽略空气阻力），后面试验均以此能量进行冲击损伤预制。

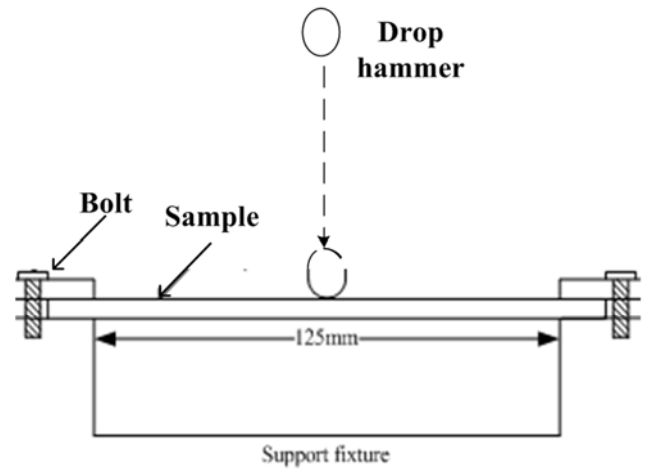


图2 落锤冲击试验示意图。

### 2.4. 超声相控阵检测（C-扫描）

本实验用于无损探伤的设备超声相控阵扫描仪OmniScan MX2，探头选用5L64-NW1型（复合材料用），含64晶片，形成49组孔径的阵列探头。超声相控阵检测技术较常规超声技术有以下优势：（1）探头尺寸小（2）检测速度快，灵活度高（3）可实现高速电子扫描，对试件进行全方位、多角度检测。图3是正在进行侧压试样的无损探伤试验。

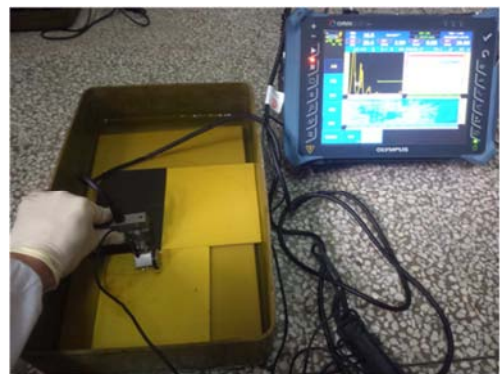


图3 超声相控阵检测。

### 2.5. 弯曲性能试验

根据《GB-T 1456-2005夹层结构弯曲性能试验方法》进行试验，弯曲试验装置和试样如图4所示。试样平放在跨距为400mm的支座上，压头通过一位于金属垫块凹槽中的细铁棒将载荷均匀施加在试样的中间区域，变形计记录中心处的挠度。压头加载速率为3mm/min，试验机横梁位移达20mm时停止加载。对完好试样、冲击试样以及修复试样分别进行弯曲试验，探究低速冲击对该泡沫夹芯结构的弯曲强度的影响，评估对该结构的修复效率。

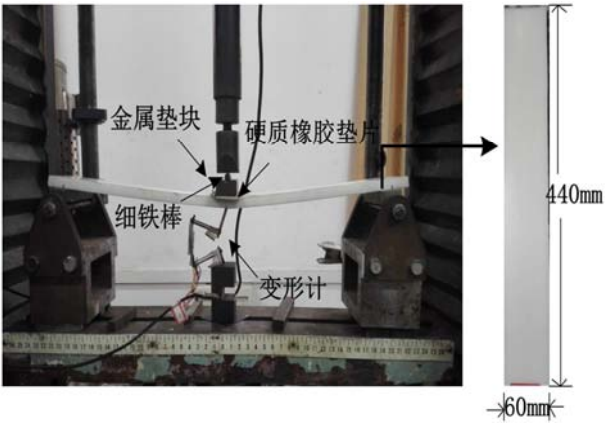


图4 三点弯曲试验装置及标准试样。

2.6. 侧向压缩性能试验

根据《GB-T 21239-2007纤维增强塑料层合板冲击后压缩性能试验方法》进行试验，侧压试验装置和试样如图5所示。设置加载速率为1mm/min，衰减率40%，夹具具有足够刚度，保证试样均匀受压不至发生屈曲。通过对完好试样、冲击试样以及修复试样的侧压试验，探究冲击损伤对此类泡沫夹芯结构的压缩强度的影响，并评估修复技术对压缩强度的修复效率。

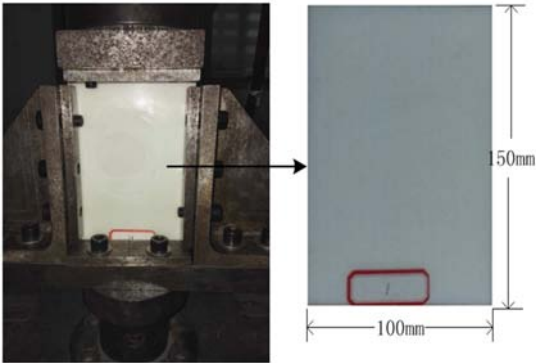


图5 侧压试验装置及标准试样。

2.7. 透波性能试验

透波试验装置及试样尺寸如图6所示，透波频段为12~24GHz。

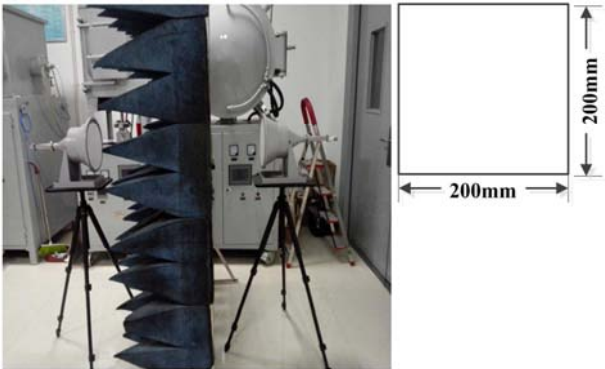


图6 透波试验装置及标准试样。

2.8. 挖补修复试验

根据C-扫图确定损伤深度，结合测量的表面凹坑尺寸，确定挖除的圆柱体尺寸，再利用自动雕刻机挖除损伤部位。根据挖除尺寸在完好的泡沫板上雕刻出同等大小的圆柱体，作为补片芯材，之后按照制备流程处理损伤部位，确保修补体系与母板体系一致。修复示意图如图7。

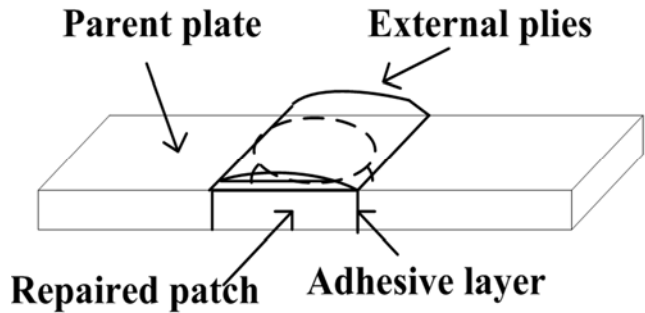
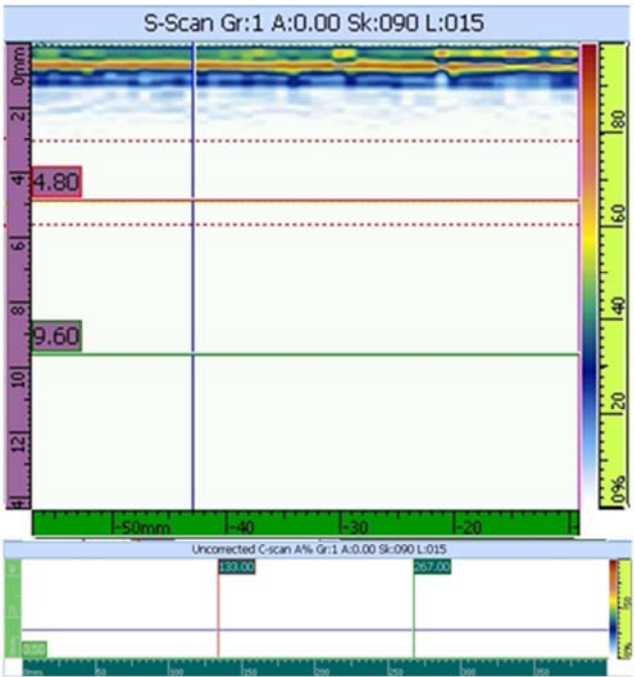


图7 挖补修复示意图。

3. 实验结果与讨论

3.1. 超声C扫图

通过超声相控阵扫描仪的C-扫图像可知试样冲击损伤的平面几何投影，通过S-扫图像可知在深度方向的损伤情况。两者结合，可精确确定挖补区域尺寸，避免挖补法对未损伤部位引入新损伤。再对比修复前后的试样扫描图像，可直观反映补片与挖除区域的胶接情况，初步判断修复效果。图8给出完好样、冲击试样以及修复试样的扫描图像，可看出，补片与挖除区域的界面结合良好，且内部损伤明显减少，预估挖补修复工艺对试样的强度恢复有重要作用。



(a) 完好试样

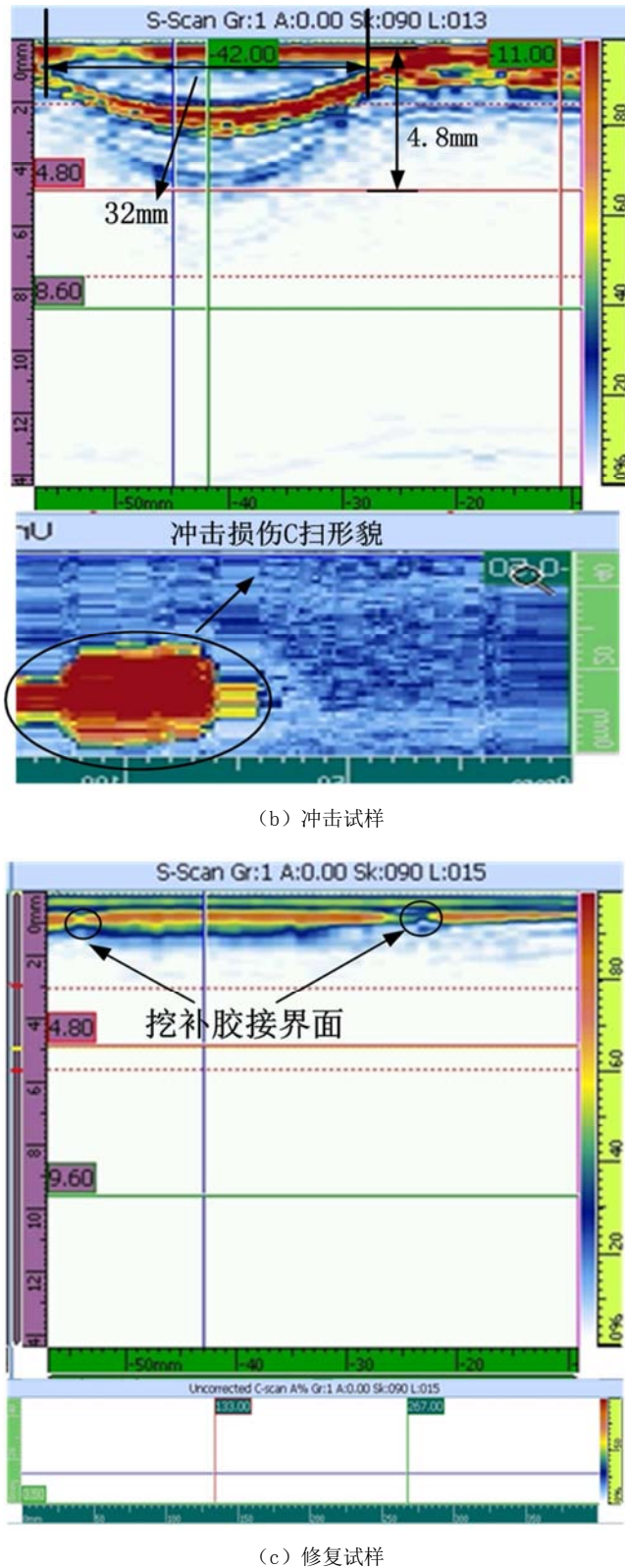
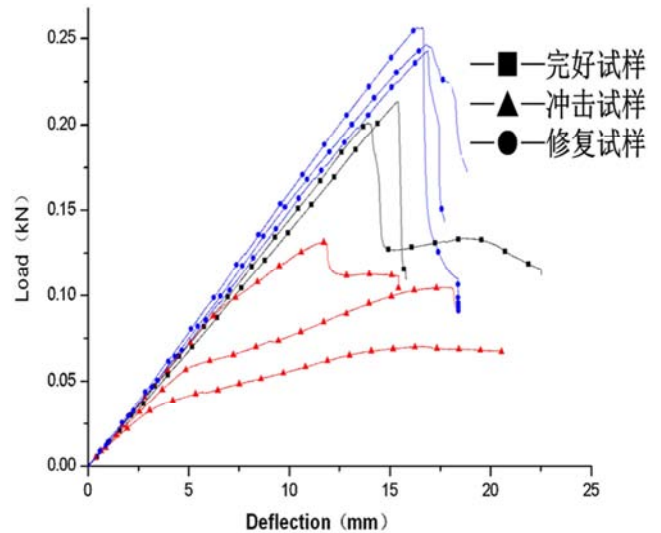


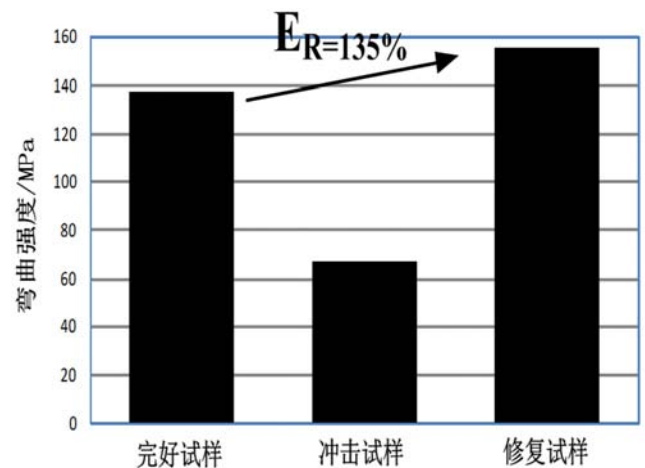
图8 超声相控阵检测图像。

### 3.2. 弯曲试验结果

为研究修复工艺对此类泡沫夹芯结构弯曲强度的恢复率，取完好试样、冲击试样及修复试样进行三点弯曲试验，测试结果如下：



(a) 载荷-位移曲线



(b) 弯曲强度

图9 弯曲试验测试结果。

由图9(a)可知，完好试样和修复试样的载荷-位移曲线趋势相同，载荷先稳步上升，直到出现峰值后，载荷迅速下降。峰值载荷的出现说明在该临界载荷下，试样出现初始裂纹，之后裂纹迅速扩展，以致承载骤然下降。观察到的试验现象：试样受载中心区表面先出现裂纹，伴有纤维断裂的脆响声，裂纹迅速扩展至边缘，继续加载，纤维与泡沫夹芯发生界面脱粘，此时判断试样已发生弯曲失效，停止试验。曲线趋势与试验现象完全一致。对于冲击试样，因为本身存在分层、纤维断裂等损伤，所以弯曲试验过程就是裂纹扩展生长的过程，观察到冲击试样较另两组试样更早出现纤维与泡沫芯材的脱粘，且承载能力明显下降。

根据《GB-T 1456-2005夹层结构弯曲性能试验方法》中公式，

$$\sigma_f = \frac{P \cdot l}{4b \cdot t_f (h - t_f)} \quad (1)$$

计算出各组弯曲强度均值，并绘制图9（b），再根据下式[11]，

$$E_R=\left[\frac{\sigma_R-\sigma_D}{\sigma_P-\sigma_D}\right] \tag{2}$$

$E_R$ 是修复效率， $\sigma_P$ 、 $\sigma_D$ 和 $\sigma_R$ 分别表示完好试样、冲击试样和修复试样的弯曲强度均值。计算得，冲击试样相对完好试样弯曲强度下降51.2%，修复试样弯曲强度恢复到完好试样的112.7%，修复效率 $E_R=135\%$ 。结果表明，该挖补修复工艺不仅对低速冲击下泡沫夹芯结构的损伤有修复作用，更在一定程度上对母板结构起到增强效果。由于补片材料体系与母板完全一致，且固化条件严格一致，唯一变量在于补片与母板胶接界面，渗入的树脂胶黏剂固化，使得补片泡沫与母板芯材之间胶接牢固，对结构弯曲强度起到一定增强效果。

3.3. 侧压试验结果

为研究修复工艺对此类泡沫夹芯结构压缩强度的恢复率，取完好试样、冲击试样及修复试样进行侧向压缩试验，测试结果如下：

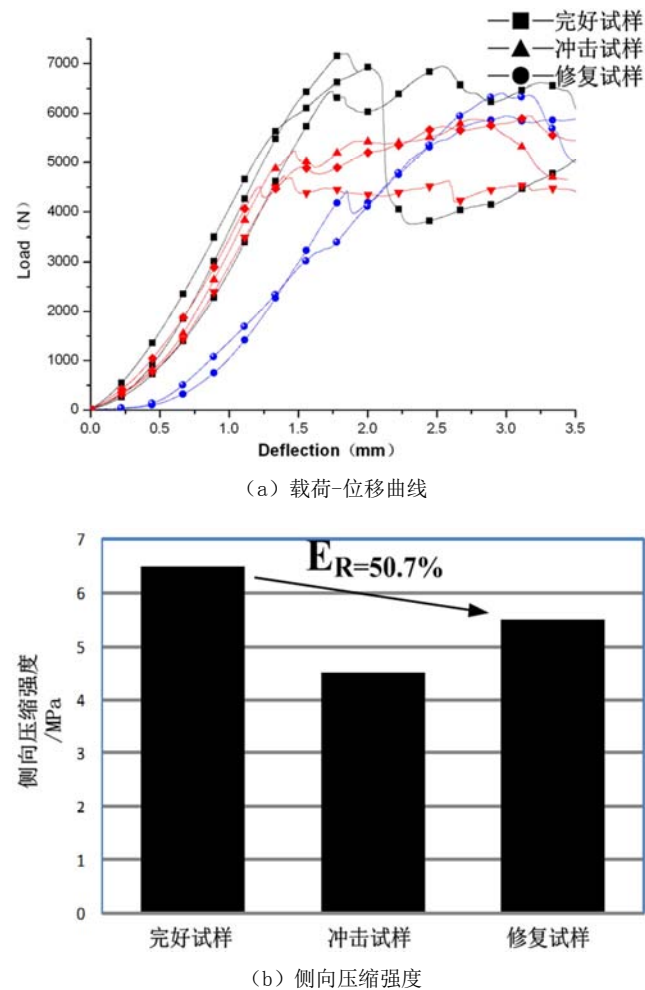


图10 侧向压缩试验结果。

由图10（a），与弯曲试验类比，完好试样与修复试样同样存在明显峰值载荷，而冲击试样则没有，因此得出相似结论，低速冲击损伤会对泡沫夹芯结构侧向压缩强度产生影响，造成侧向压缩强度明显下降。根据公式

$$\sigma=\frac{P}{bh} \tag{3}$$

$$E_R=\left[\frac{\sigma_R-\sigma_D}{\sigma_P-\sigma_D}\right] \tag{4}$$

计算出试样侧向压缩强度，冲击试样相对完好试样压缩强度下降30.2%，修复试样恢复到初始压缩强度的85.1%，修复效率 $E_R=50.7\%$ 。数据表明，该挖补修复工艺对低速冲击下泡沫夹芯结构的损伤有修复作用，虽然远不及弯曲强度的修复效率，但是，由载荷-位移曲线发现，修复试样的压缩失效时位移量远大于完好试样（几乎达到2倍），可见该修复手段对此类夹芯结构的抗压刚度有所增强。

3.4. 透波试验结果

由图11曲线可知，低速冲击对此结构的透波率有消极影响，尽管下降程度较低；而修复试样较完好试样的透波性能有明显提升，可见，该修复工艺对天线罩的透波性不仅不会产生不利影响，反而有利于透波。

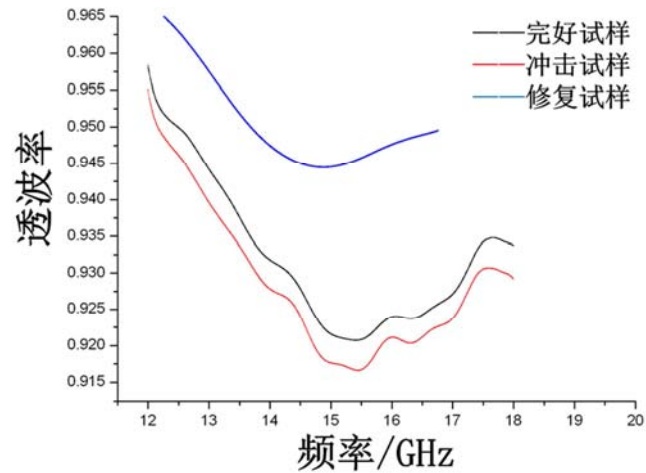


图11 透波曲线。

4. 结论

低速冲击载荷对天线罩用泡沫夹芯复合材料的力学性能有着重要影响，尤其在弯曲强度和侧向压缩强度方面，同时也会造成透波性能的下降。本试验中，低速冲击损伤造成该天线罩结构的弯曲强度下降51.2%，修复试样弯曲强度恢复到完好试样的112.7%，修复效率达135%，修复效果明显；低速冲击损伤造成该天线罩结构的侧向压缩强度下降30.2%，修复试样侧向压缩强度恢复到完好试样的85.1%，修复效率达50.7%。同时，挖补修复对该结构的透波性能有明显提升作用。

综上,采用该种挖补修复工艺对受低速冲击损伤的天线罩结构进行修复,效果明显;同时工艺条件简单,固化温度60℃,一般便携式热补仪可达到要求,故满足外场快速修复的工艺要求。可见,该修复技术对此类天线罩结构的冲击损伤修复不仅可在实验室条件下进行,也能在外场环境下进行,可应用于实际泡沫夹芯结构天线罩的外场原位修复。

---

## 参考文献

- [1] 裴晓园,陈利,李嘉禄, et al. 天线罩材料的研究进展[J]. 纺织学报, 2016,37(12):153-159。
- [2] 周秀燕,王非. 泡沫复合材料的应用与发展[J]. 纤维复合材料, 2016,(1):36-39。
- [3] Choi I, Jin G K, Seo I S, et al. Radar absorbing sandwich construction composed of CNT, PMI foam and carbon/epoxy composite[J]. Composite Structures, 2012, 94(9): 3002-3008.
- [4] 方芳. 先进复合材料在雷达上的应用[J]. 电子机械工程, 2013,29(1):27-31。
- [5] 刘玄, 张晓晴, 姚小虎. 无人机复合材料天线罩抗低能量鸟撞冲击损伤分析[C]. 全国冲击动力学学术会议, 2011。
- [6] 魏浩. 复合材料泡沫夹芯结构抗冲击性能研究[D]. 武汉理工大学, 2015。
- [7] 于渤, 韩宾, 倪长也, et al. 空心及PMI泡沫填充铝波纹夹芯梁冲击性能实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2015,49(1):86-91。
- [8] 贺强, 杨文锋, 唐庆如. 复合材料挖补修理技术研究现状与发展趋势[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015,(4):85-90。
- [9] 杨龙英, 罗辑, Yanglong-Ying, et al. 树脂基复合材料挖补修复工艺及性能研究[J]. 塑料工业, 2015,(7):82-85。
- [10] Kim P C, Dai G L, Seo I S, et al. Low-observable radomes composed of composite sandwich constructions and frequency selective surfaces[J]. Composites Science & Technology, 2008, 68(9): 2163-2170.
- [11] Bauer A, Thunga M, Obusek K, et al. Bisphenol E cyanate ester as a novel resin for repairing BMI/carbon fiber composites: Influence of cure temperature on adhesive bond strength[J]. Polymer, 2013, 54(15): 3994-4002.