

# 蜂窝夹层结构的灌注修补工艺研究

孙红卫 颜鸿斌 傅盛鸿 凌英 顾兆旃

( 航天材料及工艺研究所 北京 100076 )

**文 摘** 在对蜂窝夹层结构常见的缺陷/损伤形式、修补方法以及修补时对设备、材料及工艺的要求等进行分析总结的基础上,着重对灌注修补工艺进行了研究。研究表明,采用适当的灌注修补材料如 G7A—20,可室温固化,适于操作,密度  $0.8 \text{ g/cm}^3$ ,剥离强度  $29.4 \text{ N/cm}$ 、拉离强度  $3.4 \text{ MPa}$ ;修补后压缩强度和模量恢复原结构设计许用值的 80% 以上。

**关键词** 蜂窝夹层结构,灌注,修补

## Research on Filling Repair for Honeycomb Sandwich Structures

Sun Hongwei Yan Hongbin Fu Shenghong Ling Ying Gu Zhaozhan

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

**Abstract** On the basis of analysis and overview of the defects or damage types, repair methods, required equipment and materials as well as its processing for typical honeycomb sandwich structures, more emphases are given on the studies of filling repair process in this paper. It is shown that suitable repair material such as G7A-20 can be with a good operation and can be cured at RT, with a density of no more than  $0.8 \text{ g/cm}^3$  and tensile strength of more than  $3.4 \text{ MPa}$ , and as a result more than 80% of design allowable values of compress strength and modulus can be obtained.

**Key words** Honeycomb sandwich structure, Filling, Repair

### 1 引言

随着航天事业的发展,蜂窝夹层结构件日益得到广泛应用,从而对其修补工艺技术研究提出了迫切需要。由于市场竞争和产品质量的需要,国外在产品研制的同时就进行修补工艺研究。自 70 年代初迄今国外已有许多修补工艺技术研究、应用的报道<sup>[1-3]</sup>。针对蜂窝夹层结构等复合材料不同的缺陷和损伤形式,研究了填平、灌注和更换芯子等修补方法,修补后主要性能可恢复至设计许用极限的 80% 以上<sup>[1]</sup>。近年来,我国航天蜂窝夹层结构件应用中出现缺陷/损伤的概率越来越大,对修补工艺技术研究提出了迫切需要。本文着重对蜂窝夹层结构的灌注修补材料及工艺进行了研究。

### 2 蜂窝夹层结构件常见缺陷/损伤概况<sup>[2]</sup>

#### 2.1 蜂窝夹层结构件常见缺陷/损伤形式

从国内外产品研制、生产和使用的情况来看,蜂窝夹层结构件常见的缺陷/损伤形式,见图 1。

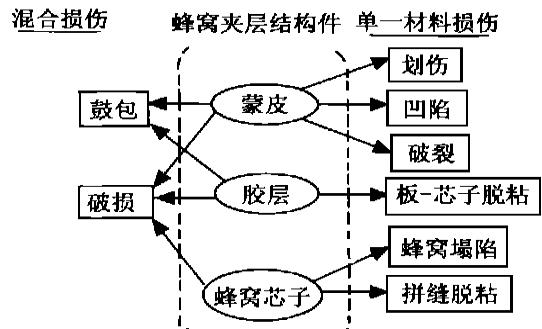


图 1 蜂窝夹层结构件常见的几种损伤形式

Fig. 1 Typical damages for honeycomb sandwich structures

收稿日期:2000-04-20

孙红卫,1966 年出生,工程师,主要从事功能复合材料的研究工作

## 2.2 蜂窝夹层结构件常见缺陷/损伤的修补方法以及对设备、材料、工艺的要求

图2是蜂窝夹层结构件常见缺陷/损伤形式对

应的修补方法,表1为蜂窝夹层结构修补方法对设备、材料、工艺的要求。

表1 蜂窝夹层结构修补方法对设备、材料、工艺的要求

Tab.1 Equipment, materials and processing demands for honeycomb sandwich structure repairs

修补方法	工艺简介	设备要求	对材料及其性能的要求	功能用途	技术难点
灌注修补	准备注胶孔和出气孔、灌胶、检测	(1)手钻; (2)灌注枪	灌注胶粘剂,要求粘度适中、密度低、收缩率低、固化工艺性好	(1)控制损伤扩展; (2)恢复强度、刚度等力学性能	(1)确定注胶孔、出气孔的数量和位置; (2)选择/研制合适的灌注枪; (3)选择/研究合适的胶粘剂
补片修补	去除损伤蒙皮,确定补片尺寸,准备补片材料,处理粘接表面,粘接、固化、检测	(1)表面处理设备; (2)热压固化设备	(1)补片材料; (2)胶粘剂其粘接强度高、中温以下最好室温固化	(1)控制损伤扩展; (2)恢复强度、刚度等力学性能	(1)局部定位及去除损伤; (2)确定补片尺寸; (3)局部加热、加压及控制; (4)选择/研究合适的胶粘剂
换芯修补	去除损伤蒙皮和芯子,代之以新的芯子或填充料,粘接补片,固化	(1)专用损伤去除设备; (2)表面处理设备; (3)热压固化设备	(1)填充料,性能与原芯子匹配; (2)补片材料; (3)胶粘剂	(1)控制损伤扩展; (2)恢复强度、刚度等力学性能	(1)确定损伤程度、开孔大小、补片尺寸; (2)局部定位及去除损伤; (3)芯子定位与拼接; (4)局部热压固化
混合修补	上述两种以上的组合	上述两种以上的组合	上述两种以上的组合	上述两种以上的组合	上述两种以上的组合
填平修补	表面处理,用胶填平	无	胶粘剂要粘性好,粘度大	一定力学性能	无

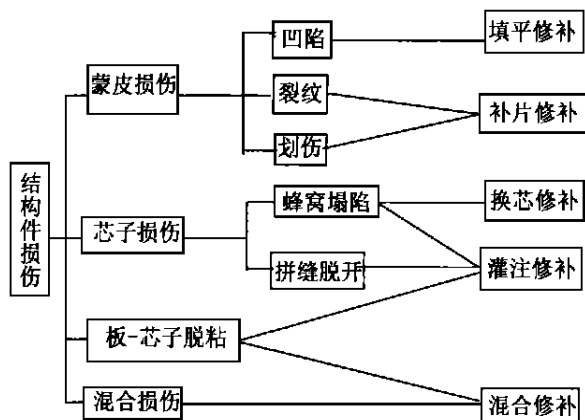


图2 蜂窝夹层结构件常见缺陷/损伤形式对应的修补方法

Fig.2 Relevant repair methods for typical honeycomb sandwich structure defects or damages

蜂窝夹层结构是由许多蜂窝芯子拼接,然后粘接面板而固化成型的。蜂窝拼接一般用胶粘剂进行

热压固化粘接。成型过程中,往往因为压力、温度、湿度、应力等影响,成型后常出现芯子拼缝脱粘。至今碰到最大的拼缝脱粘尺寸是长600mm,宽40mm。大量的科研生产实践表明,蜂窝夹层结构中蜂窝拼缝脱粘、蜂窝芯子塌陷、板芯脱粘等缺陷最为典型。而由图2可知,对于这些缺陷,一般需采用灌注低密度修补材料的修补方式。因此蜂窝夹层结构的灌注修补工艺研究极为重要。

### 3 低密度灌注修补材料及工艺研究

#### 3.1 低密度灌注修补材料设计思路

低密度灌注修补材料主要用于蜂窝芯子拼缝脱开的修补,这种修补实际上是用灌注料代替蜂窝芯子。因此要求灌注料的性能应与芯子的性能匹配,但是修补技术的关键和难点是利用比产品简单的成型工艺,如不能采用热压罐等高温高压设备,只能在室温或低于产品固化温度以及常压或真空的苛刻限制条件下把产品修补好,达到原设计或使用要求。因此低密度灌注修补材料还有其它要求,如操作性

能和固化性能等,包括粘度可灌注、密度低、收缩率低、操作寿命长、固化温度低、固化时间短(见表1)。

由上分析,灌注修补材料设计的基本思想是:

(1)选择环氧树脂基体,以获得较好的粘接性能和综合性能;

(2)选择粘度较小的树脂,以获得好的流动性;

(3)填充空心玻璃微球,降低密度和收缩率;

(4)选择活性高的固化剂,以满足室温固化的需要;

(5)加入增韧剂和增塑剂提高剥离强度,调节模量。

根据以上分析,设计了多种低密度灌注修补材料配方,并进行了性能试验。

### 3.2 低密度灌注修补材料配方及性能试验

根据以上设计思想,设计了22种配方,进行了密度、收缩率、剥离强度、拉离强度、压缩性能等试验,其结果见表2。

表2 低密度灌注修补材料配方性能试验结果

Tab.2 Test results of various low density filling repair materials

配方 编号	密度 /g·cm <sup>-3</sup>	收缩率 /%	剥离强度 /N·cm <sup>-1</sup>	拉离强度 /MPa	压缩强度 /MPa	压缩模量 /MPa
要求值	0.8	-	29.4	3.42	-	-
G7A—11	0.55	0.46	13.20	21.3	39.5	2 050
G7A—19	0.53	-	23.80	-	-	113
G7A—5	0.74	0.64	37.65	-	2.19	22
G7A—3	0.67	-	46.60	-	-	-
G7A—9	0.58	0.30	32.73	3.42	3.97	40
G7A—16	0.53	0.67	42.30	-	-	107
G7A—14	0.54	0.67	33.50	7.10	4.51	57
G7A—17	0.54	0.64	44.90	-	-	54
G7A—20	0.58	0.34	48.90	9.29	7.70	146
G7A—10	0.56	0.46	28.20	25.12	29.2	635
G7A—12	0.55	0.37	10.60	6.08	3.94	160
G7A—1	0.76	-	11.73	-	57.6	-
G7A—2	0.70	-	3.54	-	50.2	-
G7D—2	-	-	3.36	-	33.0	-
G7D—1	-	-	4.40	-	56.8	-
G7D—3	-	-	13.50	-	-	-
G7A—18	0.55	0.58	49.30	-	-	46
G7A—13	0.58	0.40	40.80	3.38	2.65	40
G7A—15	0.52	0.41	15.00	10.9	16.2	545
GDA—4	0.54	0.58	20.10	6.05	6.88	119
GDA—3	0.52	0.55	25.50	6.06	4.91	79
GDA—5	0.54	0.45	20.50	6.83	5.56	139

从表2结果看,不同组成和材料用量对配方性能的影响很大。在上述配方中,G7A—9、G7A—14、G7A—20三种材料的密度、剥离强度和拉离强度达到了研究技术指标的要求。

上述材料在多件产品的蜂窝对接缝脱开修补中得到应用,效果显著。结果表明,使用G7A—20材料进行灌注修补后,可恢复其使用性能,避免了报废,挽回重大经济损失,保证了生产进度。

### 3.3 灌注修补工艺扩大样件对比试验

试验采用3件,分别为完好件、损伤件和修补件。损伤件为去掉直径100mm的蒙皮;修补件为去掉直径100mm的蒙皮,并将蜂窝芯子进行部分破坏,修补时先将蜂窝芯子修整好,然后灌注G7A—20低密度修补料,采用J—47A胶膜粘接内、外补强片,130℃固化。外补强片材料与产品相同,即用0.4mm厚的铝蒙皮。

采用岛津DSS—25t电子万能材料试验机和专用侧压试验夹具对试验件进行侧压试验,试验速度0.5mm/min~1mm/min。试验过程中,对试验件进行逐级加载至试验件破坏,记录并绘制载荷—变形曲线,同时分别测量不同载荷级别下各应变测量点的应变值。载荷测量采用25t载荷传感器,应变测量采用Y—25静态应变测量仪和YB—1A静态电阻应变仪。

表3 完好件、修补件、损伤件侧压试验结果

Tab.3 Lateral press test results of virgin, damaged and repaired structures

试样 类别	破坏载 荷/kN	横梁位 移/mm	性能对 比/%	修补效 率*/%	破坏 模式
完好件	46.25	3.1	100		正常破坏
损伤件	30.0	2.1	65		损伤区屈服破坏
修补件	49.2	3.3	116	116	修补区外屈服破坏

\*修补效率是以完好件的破坏载荷值为基准计算而得。

从表3得出如下结果:

(1)完好件、损伤件、修补件的破坏载荷及破坏模式与试件的承载性能匹配,可看出试件承载能力依次是:修补件>完好件>损伤件;

(2)损伤件性能比完好件低35%;损伤件修补后,与完好件相比,修补效率为116%。说明修补方法可行,修补性能很好。

(下转第57页)

率大于待识样本的 90.4 %。

(2) 根据模式试样、源定位及信号的波形、常规参数、频谱、小波谱等特征的综合比较,为有监督分类器筛选出离散性小、质量较高的各类模式样本集。

(3) 宽频带声发射信号的小波变换,其类别特征明显,也易于压缩特征个数,适合于网络进行多模式多组数据的训练。

(4) 提供的模式识别方法,用于三种 C/E 复合材料试样破坏过程分析,显示出良好的应用潜力。

(5) 就实际应用而言,信号样本与模式的严格对应关系,实际铺层及其构件、声源的位置及传播衰减对波形的影响,训练效率的改善等问题,仍有待于进一步的研究。

致谢 清华大学刘时风博士提供了应用软件,空军第一研究所耿荣生教授提供了宽频带声发射传感器,在此表示衷心感谢。

#### 参考文献

1 金周庚. 钛合金气瓶声发射检测进展. 见:第六届全

国声发射会议论文集,四川,1995:100~103

2 金周庚. 碳-环氧树脂材料声发射检测技术研究. 航天科技报告,HT-920098,航空航天工业部

3 Michael R Gorman. Acoustic emission for the 1996s. In: Ultrasonics Symposium,1991:1 039~1 046

4 刘时风. 焊接缺陷声发射检测信号谱估计及人工神经网络模式识别研究. 清华大学博士学位论文,1996

5 Hiroaki S, Tetsuo K, Mikio T et al. Fracture mode detection of glass-fiber composites by AE processing. In: Progress in Acoustic Emission VIII,1996:47~52

6 Kanji Ono, Qixin H. Pattern recognition analysis of acoustic emission signals. In: Progress in Acoustic Emission VII, 1994:69~78

7 Anastassopoulos A A, Vahaviolos S J, Lenain J C. Signature recognition of acoustic emission from FRP structures. In: 7<sup>th</sup> EC-NDT, Copenhagen, 1998

8 Adriano Almeida, Eric v K Hill. Neural network detection of fatigue crack growth in riveted joints using acoustic emission. Material Evaluation, 1995;1:76~82

(上接第 39 页)

#### 4 结论

(1) 对蜂窝夹层结构常见的缺陷/损伤形式、修补方法以及修补时对设备、材料及工艺的要求等进行了分析、归纳、总结。这对蜂窝夹层结构的修补工艺研究有一定的指导意义。

(2) 在对航天产品中的蜂窝夹层结构的典型缺陷损伤事例进行调研的基础上,着重对灌注修补材料和工艺进行了研究。研制出了合乎要求的低密度灌注修补材料如 G7A-20。它可室温固化,适于操作,密度  $0.8 \text{ g/cm}^3$ ,剥离强度  $29.4 \text{ N/cm}$ 、拉离强

度  $3.4 \text{ MPa}$ ;修补后强度和模量恢复原结构设计许用值的 80% 以上,扩大样件对比试验表明其修补效率可达 116%。

#### 参考文献

1 Horton R E, McCarty J E. Adhesive Bonded Aerospace Structure Standardized Repair Handbook. AD - A 055 684,1977

2 Dang Jiali et al. Repair of large aluminum honeycomb sandwich fairing for launch vehicles. In: China-European Union Workshop on New Materials Research, Beijing, China, 1998:173

3 Wegman R E, Tullos T R. Hand Book of Adhesive Bonded Structure Standard Repair Handbook. USA: Noyes Publication, 1992