

蜂窝结构板后埋件拉脱力的影响因素

李莺歌 郑建虎 张玉生 屠永刚 张宏宇

(北京卫星制造厂,北京 100190)

文 摘 介绍了蜂窝结构板上 M5 后埋直通连接件的拉脱力测试条件及结果,分析了后埋件胶接施工过程、胶接固化规范对后埋件拉脱力和胶接质量的影响。结果表明,沿开孔轴向竖直灌胶后再安装埋件,胶液填充效果最好,气孔最少,有利于提高拉脱力;对于 EA934NA 后埋胶,于室温 $\geq 22^{\circ}\text{C}$ 下完成固化,更有利于提高拉脱力。所得结果可为产品试验设计和拟定工艺参数提供参考。

关键词 蜂窝结构板,后埋件,胶接质量,拉脱力,影响因素

中图分类号:TB333

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.04.019

Influencing Factor of Pulling Test of Post-Inserts in Honeycomb Panel

LI Yingge ZHENG Jianhu ZHANG Yusheng TU Yonggang ZHANG Hongyu

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100190)

Abstract In this work, the pulling test condition and test results of M5 post-insert through-hole connector in a honeycomb panel were discussed. The influence of post-insert connector application and curing processing protocol on the pulling strength and bonding quality were analyzed. It was found that the best way to apply the resin is to install the inserts after vertically fill the resin along the axial of the through holes. Minimum pores and improved pulling strength were achieved with this method. For EA934NA post-insert bonding agent, curing at room temperature ($\geq 22^{\circ}\text{C}$) is preferable for better pulling strength. The conclusions of this work can be used as references for future product test design and processing configuration setup.

Key words Honeycomb Panel, Post-insert, Bonding quality, Pulling strength, Influencing factors

0 引言

蜂窝结构在卫星结构中主要用于组成星体舱段、安装有效载荷等。为保证其连接强度和刚度,维持星体外部形状,实现卫星不同舱段结构的连接和载荷传递,提供对卫星设备的安装、支撑等需求。卫星蜂窝结构多为板件,其上镶嵌有种类较多的金属埋件,形成传力接头。埋件结构是航空航天结构设计中广泛使用的连接部件,是蜂窝结构与其它结构连接时的主要受力部件^[1]。根据制备工艺的不同,分为预埋件和后埋件。预埋件是用胶黏剂将金属埋件与蜂窝结构的面板、蜂窝芯材采取共固化技术,同步复合为一体;后埋件则是在固化成型的蜂窝结构板上开孔,利用胶黏剂将金属埋件胶接固定在蜂窝结构板的开孔内。对比两种埋件制备工艺得出,后者可在不同阶段、多种状态下形成,有利于生产安排并行作业,更有利于提高卫星结构的产品化和快速响应能力,应用前景非常良好。影响后埋件性能的因素,包括组成材

料、结构参数和制备工艺等方面。本文仅就形成 M5 后埋直通连接件的制备工艺过程、胶接固化规范,对后埋件拉脱力的影响进行简要叙述。

1 实验

1.1 试件

1.1.1 尺寸及构型

在平面尺寸为 100 mm \times 200 mm 蜂窝结构板上,安装胶接 M5 后埋直通连接件,见图 1。

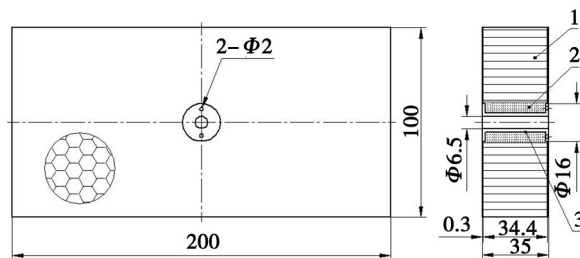


图 1 测定拉脱力试件

Fig. 1 Parts of pulling test

1—铝蜂窝结构板;2—胶黏剂;3—金属埋件。

收稿日期:2014-05-22

作者简介:李莺歌,1978 年出生,高级工程师,主要从事星船复合材料成形工艺工作。E-mail:yingge1978@sina.com

1.1.2 材料

(1) 面板: 铝板 LY12-CZ (GBn167—82), 厚度 0.3 mm。

(2) 金属埋件: 铝棒 2A12-T4 (GB/T3191—1998), 直径 18 mm。

(3) 铝蜂窝芯材: LF2-Y (HB5443—90), 铝箔厚度 0.03 mm, 格孔边长 5 mm, 芯高 34.4 mm。

(4) 胶黏剂: 面板与芯材连接采用 J-47 系列结构胶黏剂 (QB/HSY003), 包括底胶 J47B 和胶膜 J47C, 厚度 0.15 mm, 其室温剪切强度大于 21.8 MPa。后埋灌注胶采用 EA934NA (美国 HYSOL), 为 A、B 组份, A:B=100:33, 其室温剪切强度大于 23.2 MPa, 压缩强度大于 24.8 MPa^[2]。

1.1.3 制备工艺

1.1.3.1 金属埋件制备工艺

金属埋件按型号常用 M5 后埋直通连接件 P-

HM/NL-5×350 加工, 一端设计有 2-Φ2 mm 透气孔。

1.1.3.2 表面处理工艺

面板、金属埋件表面采取磷酸阳极氧化处理, 铝蜂窝芯材端面采用乙酸乙酯清洗。

1.1.3.3 蜂窝结构板制备工艺

蜂窝结构板采用组合胶接法制备, 即先加工面板、铝蜂窝芯材, 经表面处理, 在面板胶接面涂底胶, 涂胶量为 $(80 \pm 20) \text{ g/m}^2$, 然后将胶膜铺放在面板的胶接面上, 将面板与铝蜂窝芯材组合后采用真空袋—热压罐法固化^[3], 固化最高温度 130℃, 在 130℃ 下保持 2 h, 室温下开始抽真空, 温度升至适当值时充气加压 0.12 MPa。

1.1.3.4 后埋件胶接施工过程

不同试件, 其后埋件胶接施工过程的差异见图 2。

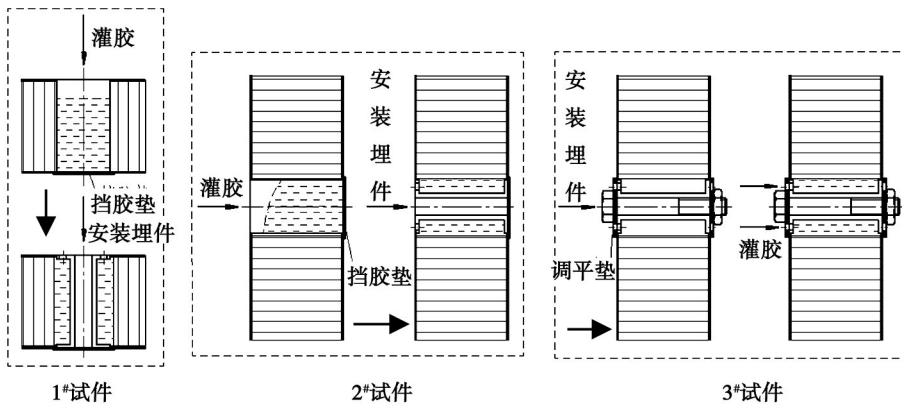


图 2 后埋件胶接施工过程差异

Fig. 2 Difference of post-inserts connector application

1#试件, 蜂窝结构板上的埋件安装孔轴心与水平面垂直, 先在安装孔下方粘贴挡胶垫, 然后沿开孔轴线竖直向孔内灌胶, 胶量合适后在埋件无透气孔的一端粘贴隔离层, 并安装埋件, 使 2-Φ2 mm 孔溢出胶液。

2#试件, 蜂窝结构板上的埋件安装孔轴心与水平面平行, 先在安装孔一端粘贴挡胶垫, 然后沿开孔轴线水平向孔内灌胶, 胶量合适后在埋件无透气孔的一端粘贴隔离层, 并安装埋件, 使 2-Φ2mm 孔溢出胶液。

3#试件, 蜂窝结构板上的埋件安装孔轴心与水平面平行, 先准备调平垫, 在其与蜂窝板的接触面粘贴隔离层, 然后将埋件安装在蜂窝结构板的开孔内, 利用调平垫和螺钉紧固埋件, 使其两端面与蜂窝结构板的面板平齐, 且 2-Φ2mm 孔心连线呈竖直状, 最后由下方 Φ2 mm 孔向内注胶, 直至上方 Φ2 mm 孔不断溢出胶液。

1.1.3.5 后埋件胶接固化规范

4#试件, 室温 $\geq 22^\circ\text{C}$ 下停放 7 d;

5#试件, 室温 $\geq 22^\circ\text{C}$ 下静置 24 h 后, 于 $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下, 保持 3 h。

1.2 测试夹具

测试夹具由底板、上压板、调平块、紧固螺杆、加载螺杆和装夹螺栓等组成。底板有螺纹接口, 可通过紧固螺杆固定在试验机上; 上压板有加载口, 试验机可通过加载螺杆对试样施加拉脱力^[4], 加载口的尺寸为 Φ60 mm; 通过装夹螺栓、调平块可将试样水平固定在底板与上压板之间。

1.3 装夹及加载

在 Instron 万能试验机上测定后埋件的拉脱力, 试件安装状态见图 3。具体要求如下:

(1) 将试件居中放置在底板上, 盖上上压板;

(2) 安装装夹螺栓, 将试件紧固在底板与上压板之间;

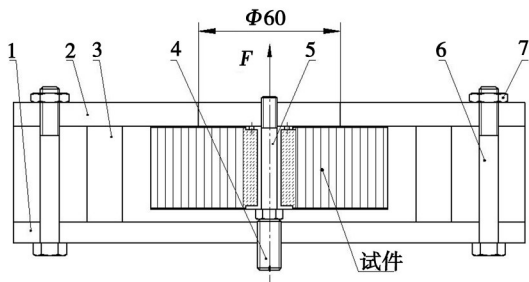


图3 后埋件拉脱力测试装夹示意图

Fig. 3 Scheme of post-insert pulling test

1—底板;2—上压板;3—调平块;4—紧固螺杆;
5—加载螺杆;6—装夹螺栓;7—螺母。

(3) 对称放置调平块,调节装夹螺栓上的螺母,使底板与上压板平行,调平试样;

(4) 在底板上拧入紧固螺杆,将试件水平固定在试验机上;

(5) 开启试验机对中,使紧固螺杆、加载螺杆位

于同一轴线并与埋件端面垂直;

(6) 对试件施加纵向拉伸力,先预加载 0.1 kN,再以 5 mm/min 的速度加载直至试件破坏。

2 结果与讨论

2.1 胶接施工过程对后埋件胶接质量的影响

蜂窝结构板内的后埋件通过灌注在后埋孔内的胶黏剂,将其与蜂窝结构板连接为一体,并在埋件周围起一定加强作用。在一定程度上,埋件周围胶量越多,胶液填充越均匀,胶液内裹入的气泡越少越小,越有利于提高后埋件的胶接质量,从而提高埋件的承载能力。不同的胶接施工过程对后埋孔内胶黏剂的填充效果影响显著。为分析胶接施工过程对后埋件胶接质量的影响,采用本文 1.1.3-(4) 相应条件分别制成 1[#]、2[#]、3[#] 试件,经同一固化规范固化后,其剖切面形貌见图 4。

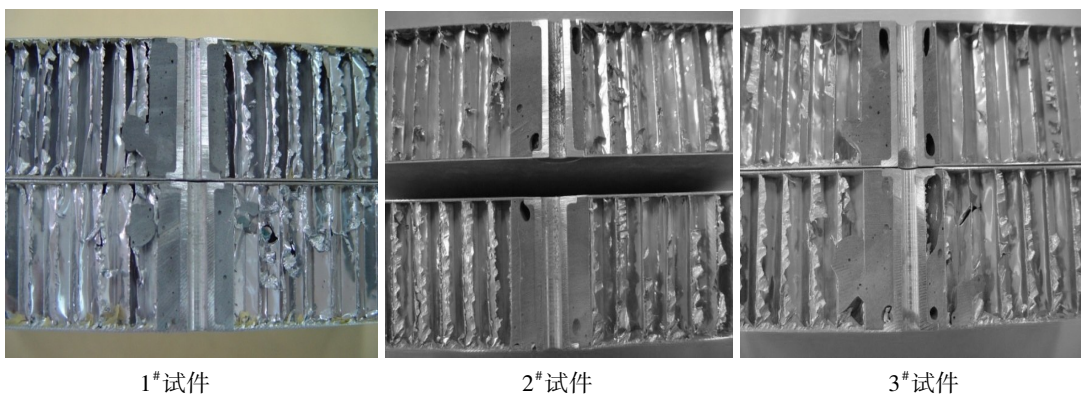


图4 不同胶接施工过程的后埋件剖切形貌

Fig. 4 Section appearance of post-insert connector by different application

图 4 表明,对比沿开孔轴向水平灌胶后再安装埋件,以及先安装埋件,再通过埋件上的 $\Phi 2$ mm 孔水平向孔内注胶,沿开孔轴向垂直灌胶后再安装埋件,胶液受自重影响,更有利于沉积在后埋孔内,并随胶液流动赶出孔内气泡,因此埋件周围的胶液填充效果最好,胶液中裹入的气孔量少,且体积非常小,胶液填充均匀,在埋件周围形成的加强承载面最大,因此更有利于提高后埋件的胶接质量和拉脱力。

2.2 胶接施工过程对后埋件拉脱力的影响

蜂窝结构板在拉脱载荷作用下,埋件受到的力会经过周围的胶黏剂以剪切力的形式传递给周围的蜂窝夹芯和面板,由于胶接施工过程对胶黏剂填充效果影响较大,为进一步分析其对后埋件拉脱力的影响,对 1[#]、2[#]、3[#] 试件进行拉脱实验,结果见表 1,破坏后的试件形貌见图 5。

测试结果表明胶接施工过程对后埋件的拉脱力有显著影响,其中,1[#] 试件采用的胶接施工过程最优,

后埋件所能承受的拉脱力最高,其 F_1 值较其他两类工艺高出约 14%,破坏载荷值分别高出 35% 和 18%。分析认为垂直灌胶后再安装埋件,有利于胶液沉积和气体逸出,且能使埋件周围胶量均匀、胶液填充半径增大,因而可提高后埋件的胶接质量和拉脱力。而沿埋件安装孔轴向水平灌注胶,埋件上方胶液少,多余空间会裹入大量气泡,不利于提高后埋件周围胶黏剂的加强效果,会对拉脱力产生不利影响。

表 1 不同胶接施工过程的后埋接头拉脱力¹⁾

Tab. 1 Result of pulling test by different application

试件	$F_1/\text{kN}^{1)}$			$F_2/\text{kN}^{2)}$		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
1 [#]	1.776	1.896	1.842	2.989	3.482	3.154
2 [#]	1.628	1.667	1.649	2.126	2.488	2.342
3 [#]	1.595	1.716	1.644	2.429	3.192	2.668

注:1) F_1 为载荷一位移曲线的拐点值;2) F_2 为破坏载荷。

试件的破坏形貌表明,经拉脱破坏后,埋件周围有限区域的蜂窝芯变形严重,距离埋件较近的区域已发生撕裂破坏,其外围蜂窝也出现明显的皱褶失稳现象。而且埋件所在区域的上、下面板也出现了明显的拉伸变形,证实埋件所受拉脱载荷的确会通过胶黏剂传递给周围的蜂窝夹芯和面板。

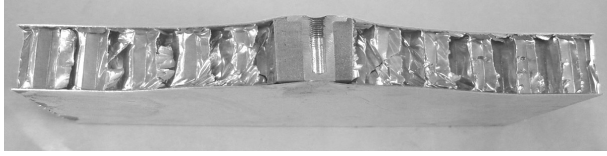


图5 M5后埋直通连接件拉脱破坏形貌

Fig.5 Destroyed appearance of M5 post-insert through-hole connector

蜂窝结构板的后埋件承受拉脱载荷时,假设胶液填充深度等于蜂窝芯高度,则埋件的拉脱承载能力为^[5]:

$$p_{ss(a)} = (2\pi b t_c \tau_c) / (c^* K_{\max})$$

式中: b 为胶液有效填充半径; t_c 为蜂窝芯高度; τ_c 为蜂窝芯剪切强度; $c^* = \beta / (\beta + 1)$, $\beta = t_c / t_f$, t_f 为面板厚度。

$$K_{\max} = \frac{b}{r_{\tau_{\max}}} \{ 1 - \sqrt{r_{\tau_{\max}} / B} \exp[\alpha(b - r_{\tau_{\max}})] \}$$

$$\alpha = \frac{1}{t_f} \sqrt{\frac{G_c}{E_f} 12(1 - \nu_f^2) \frac{\beta}{2} + 1 + \frac{2}{3\beta}}$$

$$r_{\tau_{\max}} = b \{ 1 - \exp[c_2(ab)^n] \}^{-1}$$

式中, G_c 为蜂窝芯剪切模量; E_f 为面板弹性模量; $c_2 = 0.931714$; $n = 0.262866$ 。

由此可知,胶黏剂的力学性能对埋件的拉脱力影响可以忽略,但胶液的灌注情况如有效填充半径对埋件的承载性能有决定性的影响。这是由于埋件受到的拉脱力经过周围的胶黏剂以剪切力形式传递给周围的蜂窝夹芯,而蜂窝芯子的剪切强度远低于胶黏剂的剪切强度,在垂直于面板的法向载荷作用下,蜂窝夹芯在未达到屈服强度极限时,就发生了皱褶现象,随着载荷加大,蜂窝夹芯的受力情况便由起初的受剪切力变为了沿蜂窝夹芯对角线的拉力,最终使得胶黏剂周围的蜂窝芯被撕裂破坏,埋件系统承载失效^[5-6]。因此,胶液的有效填充半径增大,载荷的分布情况就会得到改善,埋件所能承受的拉脱力便会增加。

2.3 固化规范对后埋件拉脱力的影响

4#、5#试件的拉脱力测试结果见表2。表2数据表明于室温 $\geq 22^\circ\text{C}$ 下完成固化,更有利于提高后埋件的拉脱力,其 F_1 值较加热固化高出约9%,破坏载荷高出约10%。分析认为,由于EA934NA胶黏剂与铝

合金后埋件的热膨胀系数不同,固化时后埋件胶接区域会产生残余热应力。由于金属埋件的刚性比胶黏剂大得多,若假定胶黏剂的变形全被埋件约束,所产生的热应力为^[7]:

$$\sigma^T = \alpha \Delta T_0$$

式中, σ^T 为胶层残余应力; E 为蜂窝芯高度胶黏剂弹性模量; α 为胶黏剂的线胀系数; ΔT_0 为温度差。

由上式可知,加热固化相比室温固化,后埋件胶接区域的固化残余应力更大,不利于提高后埋件周围胶黏剂与蜂窝芯之间的剪切载荷传递。因此,卫星研制过程,若时间允许,建议采用室温固化。

表2 不同固化规范的后埋件拉脱力

Tab.2 Result of pulling test by different curing processing protocol

试件	F_1/kN			F_2/kN		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
4#	1.668	2.089	1.832	2.406	3.849	2.829
5#	1.648	1.709	1.680	2.329	2.808	2.569

3 结论

(1)沿埋件安装孔轴向竖直灌胶,埋件周围胶液填充效果最优,胶液中裹入的气孔最少,体积最小。

(2)对比三种胶接施工过程,1#试件的胶接施工过程最优,可使后埋接头拉脱力 F_1 值提高14%,破坏载荷提高18%和35%。

(3)对于EA934NA后埋胶,于室温 $\geq 22^\circ\text{C}$ 下完成固化,后埋接头所能承受的拉脱力较加热固化,其 F_1 值高出9%,破坏载荷高出10%。

参考文献

- [1] 法洋洋,陈秀华. 蜂窝夹层结构拉脱破坏的有限元分析[J]. 机械工程材料, 2012, 36(10): 86
- [2] 高慎斌,杨庭相,赵仪,等. 卫星制造技术(下)[M]. 北京:宇航出版社, 1998: 32~47
- [3] 章令辉,等. 蜂窝夹层结构常见制造缺陷分析[J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(1): 58
- [4] 李莺歌,宫项,等. 蜂窝夹层结构埋件拉脱力的影响因素[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(3): 39
- [5] 冯纪生. 蜂窝夹层板后埋件的连接设计[J]. 航天器工程, 1998, 7(2): 44-51
- [6] 侯向阳. 蜂窝夹层结构埋件拉脱破坏机理研究[C]. 中国宇航学会飞行器总体专业委员会论文集, 2005: 690-695
- [7] 游敏,郑小玲. 连接结构分析[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2003

(编辑 任涛)