

蜂窝夹层结构埋件拉脱力的影响因素

李莺歌 宫 頊 黎 昱 王明先

(北京卫星制造厂,北京 100190)

文 摘 介绍了蜂窝夹层结构 M5 埋件的拉脱力测试条件及结果,分析了试样平面尺寸、真空压力、发泡胶用量和蜂窝-埋件高度阶差对拉脱力的影响。结果表明,当蜂窝-埋件高度阶差为 0.15~0.40 mm 时对拉脱力无明显影响;试样平面尺寸达到测试夹具加载口孔径 2 倍以上,方可避免边界效应影响;对于 J-47D 发泡胶,温度达到 T_1 后加气压、卸真空更有利于提高拉脱力;合理优化埋件周围发泡胶填充量,既能节省发泡胶,又能提高埋件拉脱力。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 蜂窝夹层结构,埋件,拉脱力,影响因素

Studies on Factors Influencing Honeycomb-Structure Insert Pull-Out Strength

Li Yingge Gong Xu Li Yu Wang Mingxian

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100190)

Abstract The pull-out conditions of M5 inserts in honeycomb sandwich structures were tested. Results were discussed and the effects of sample dimension, vacuum pressure, amount of foaming resin and honeycomb-insert height differences on the pull-out strength were analyzed. It was found that the pull-out strength were not affected when the honeycomb-insert height step was between 0.15 and 0.40 mm. In order to avoid the boundary effect, the sample dimension should be at least twice of the aperture of the testing clamp. For J-47D foaming resin, it is helpful to the pull-out strength during the pressure loading or the vacuum unloading when the temperature has reached T_1 . Moreover, optimization of the foaming resin around the inserts can improve the pull-out strength. The conclusions can be used in product design experiments and processing parametric initiation.

Key words Honeycomb sandwich structure, Inserts, Pull-out strength, Influencing factors

0 引言

在航天器复合材料结构中,蜂窝夹层结构是其基本的结构部件^[1],用于提供支撑、承受和传递载荷、保持刚度等作用,各部组件相互间的连接以及仪器的安装主要依靠埋件来实现,载荷通过埋件传递并分散到整个结构中。因此,埋件的拉脱强度直接影响结构的可靠性。本文简述埋件拉脱力的测试结果,从试样平面尺寸、真空压力、发泡胶用量、蜂窝-埋件高度阶差等方面分析了对拉脱力的影响。

1 实验

1.1 试样

1.1.1 材料

(1) 面板,铝板 LY12-CZ (GBn167-82),厚度 0.3 mm;

(2) 埋件,铝棒 2A12-T4 (GB/T3191-1998),直

径 22 mm;

(3) 蜂窝芯 LF2-Y (HB5443-90),铝箔厚度 0.03 mm,格孔边长 5 mm,芯高 25 mm;

(4) J-47 系列 (QB/HSY003) 胶黏剂 底胶 J47B;胶膜 J47C,厚度 0.15 mm;发泡胶 J-47D,厚度 1 mm。

1.1.2 制备工艺

(1) 埋件,按型号常用 M5 埋件 P-YM/ZL-5×250 加工;

(2) 面板、埋件表面处理,磷酸阳极氧化处理;

(3) 蜂窝芯端面处理,乙酸乙酯清洗;

(4) 胶接工艺,将底胶均匀地涂于面板、埋件的胶接面上,涂胶量为 (80 ± 20) g/m²,然后将胶膜铺放在面板的胶接面上;

(5) 固化工艺,采用真空袋—热压罐法固化^[2],

收稿日期:2010-10-22

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。

固化温度 130℃, 时间 2 h, 固化过程的真空压加工工艺见 2.2。

1.2 测试夹具

测试夹具由底板、上压板、紧固螺杆、加载螺杆和装夹螺栓等组成。底板有螺纹接口, 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, 加载口的尺寸应根据试样上埋件承受拉脱力的情况确定; 装夹螺栓将试样固定在底板与上压板之间。

1.3 测试条件

不同平面尺寸试样埋件的拉脱力测试条件如下:

- (1) 试样 a, 平面尺寸 100 mm×100 mm, 夹具加载口孔径 60 mm;
- (2) 试样 b, 平面尺寸 200 mm×200 mm, 夹具加载口孔径 100 mm;
- (3) 试样 c, 平面尺寸 150 mm×150 mm, 夹具加载口孔径 60 mm。

1.4 装夹及加载

埋件拉脱力在 Instron 万能试验机上测定, 试样装夹在专用测试夹具上, 见图 1。具体要求如下:

- (1) 将试样居中放置在底板上, 盖上上压板;
- (2) 安装装夹螺栓, 将试样紧固在底板与上压板之间;
- (3) 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, 将试样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) 对试样施加纵向拉伸力, 先预加载 0.1 kN, 再以 5 mm/min 的速率加载直至试样破坏。



图 1 埋件拉脱力测试图

Fig. 1 Apparatus setup of insert pull-out experiments

2 结果与讨论

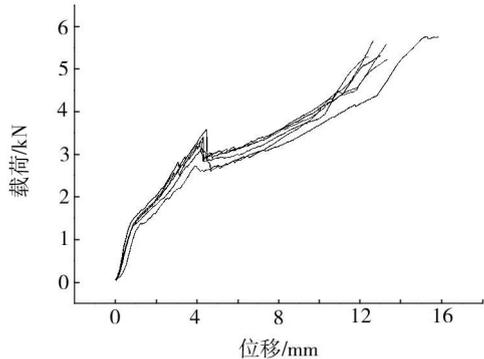
2.1 不同平面尺寸试样埋件的拉脱力

不同平面尺寸试样埋件的拉脱力测试结果列入表 1, 图 2 为拉脱—载荷位移曲线, 破坏后的试样形貌见图 3。

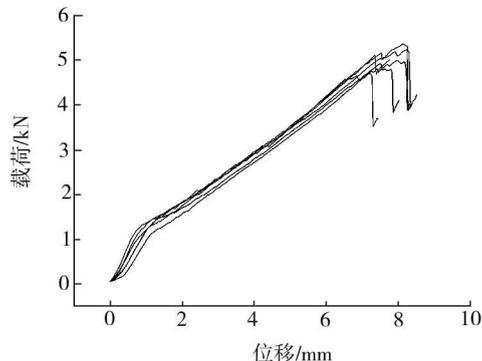
表 1 M5 埋件拉脱力测试结果

Tab. 1 Results of M5 inserts pull-out experiments

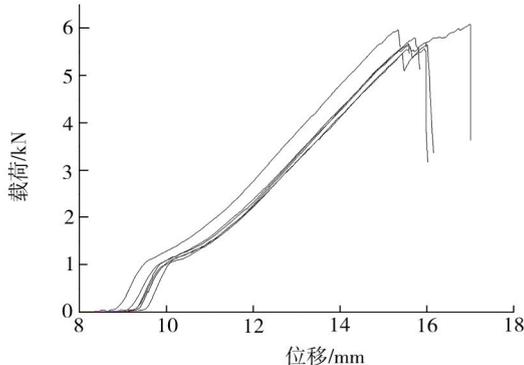
项目	试样 a		试样 b		试样 c	
	质量/g	拉脱力/N	质量/g	拉脱力/N	质量/g	拉脱力/N
平均值	41.82	5476	132.07	5064	82.9	5812
离散系数	1.32%	4.21%	0.83%	4.58%	0.79%	3.05%



(a) a 试样



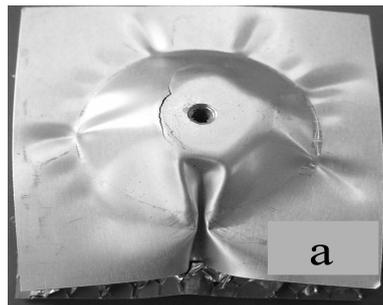
(b) b 试样



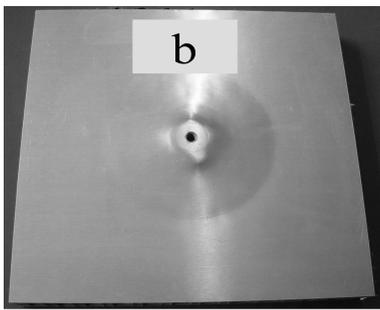
(c) c 试样

图 2 M5 埋件拉脱载荷—位移曲线

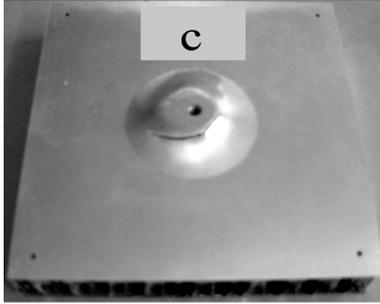
Fig. 2 Load-displacement curve of M5 insert pull-out experiment



(a) a 试样



(b) b 试样



(c) c 试样

图3 M5埋件拉脱破坏形貌

Fig.3 Photo of M5 insert pull-out damage

经测试发现,试样 a 变形大,边缘局部区域蜂窝芯完全失稳,上、下面板挤拉变形并相互靠近,在载荷达到 3.5 kN 附近时拉伸曲线有一定波动。试样 b、试样 c 破坏形貌与理论分析接近,拉伸曲线相似且无明显波动;经分析认为试样 a 是由于平面尺寸较小,发生边界效应而引起变形。对比试样 b、试样 c,得出试样大小应视测试夹具加载口直径确定,当试样平面尺寸达到加载口孔径 2 倍以上(含)时,可消除边界效应影响。

此外,由试样 b、试样 c 的拉伸曲线发现,选用加载口孔径 60 mm 的夹具测得拉伸曲线拐点(认为载荷低于拐点载荷值,结构形变属弹性变形)较加载口孔径 100 mm 的夹具略低。为分析其原因,建立了 M5 埋件的有限元分析模型,分析了试样在弹性变形内最大拉脱载荷作用下各部分的受力情况,获得在距离埋件中心 20 mm 附近蜂窝芯及面板的应力均达到最大,而在距离埋件中心大于 50 mm 位置处的蜂窝芯及面板的应力均趋于平缓。因此,测试夹具的加载口孔径应为 100 mm 较宜。

2.2 真空压对埋件拉脱力的影响

按照相同的参数制备了 3 组 M5 埋件拉脱试样,设计 3 种真空压的施加工艺,即工艺 I 为真空压于室

温施加,温度升至 T_1 时加 0.2 MPa 气压,同时卸掉真空;工艺 II 为真空压于室温施加,温度升至 T_2 时加 0.2 MPa 气压,同时卸掉真空;工艺 III 为真空压与 0.1 MPa 气压于室温施加并保持到固化结束。经对试样采用加载口孔径 100 mm 的夹具进行拉脱力测试,测试结果见表 2。

表 2 不同工艺下 M5 埋件拉脱力测试结果

Tab.2 Results of M5 inserts pull-out experiments

项目	工艺 I		工艺 II		工艺 III	
	质量/g	拉脱力/N	质量/g	拉脱力/N	质量/g	拉脱力/N
平均值	40.83	6614	41.82	5476	41.07	4205
离散系数	0.85%	9.55%	1.32%	4.21%	8.28%	18.8%

表 2 数据表明一直抽真空不利于提高埋件的拉脱力,而 T_1 后卸真空, M5 埋件所能承受的拉脱力平均值较 T_2 后卸真空高出 1.1 kN。经分析认为,埋件通过发泡胶与周围蜂窝芯嵌连为一体,发泡胶既有胶接作用,又有对装配胶接间隙起填充和加强的作用,因此,适当延长抽真空时间,有利于提高发泡胶的胶接强度,进而提高埋件拉脱力,但真空时间若持续过长,不利于发泡胶发泡,会削弱其填充加强作用。

2.3 不同发泡胶用量的拉脱力

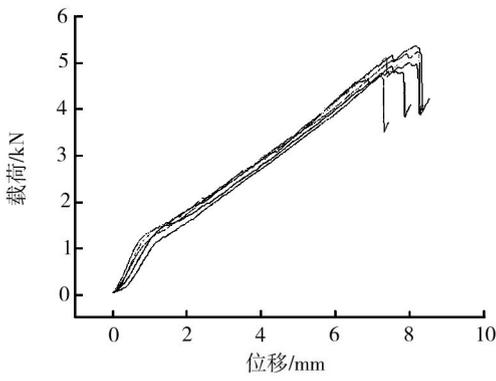
埋件周围的发泡胶将其与蜂窝芯嵌连为一体,在埋件区域起一定加强作用,一定程度增加发泡胶用量可提高埋件的拉脱力,但会导致结构质量增加。为分析发泡胶用量对埋件拉脱力的影响,设计 4 种发泡胶填充量,即 1# 试样沿埋件外圆包裹 6 圈发泡胶;2# 试样沿埋件外圆包裹 1 圈发泡胶,又用蜂窝芯包裹至 $\Phi 20$ mm 后再包裹 1 圈发泡胶;3# 试样沿埋件外圆包裹 4 圈发泡胶;4# 试样沿埋件外圆包裹 3 圈发泡胶后再在埋件周围蜂窝格孔内填充 2 圈发泡胶。按照相同的固化制度(室温抽真空至 90℃ 后加气压,同时卸真空)同炉制备 4 组 M5 埋件拉脱试样,采用加载口孔径 100 mm 的夹具对其进行拉脱力测试,测试结果见表 3,拉伸曲线见图 4。

测试结果表明拉脱力与发泡胶用量并非成正比关系,发泡胶的填裹方式对拉脱力有重要影响,如表 3 中 4# 试样,埋件周围格外填充发泡胶导致用量成倍增加,但对埋件承受拉脱载荷的作用只是能提高拐点力,对最终的破坏载荷贡献不大,而且测得的拉伸曲线波动大,拉脱力数据离散性大。

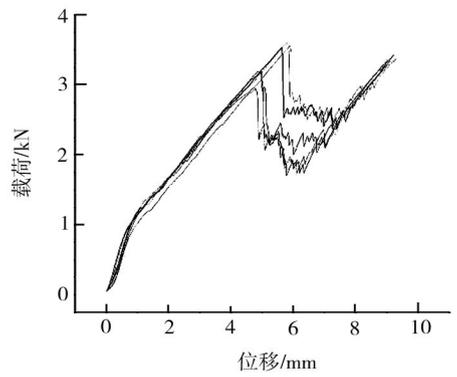
表 3 不同发泡胶用量 M5 埋件拉脱力测试结果

Tab.3 Results of M5 inserts pull-out experiments with different foaming resin quantity

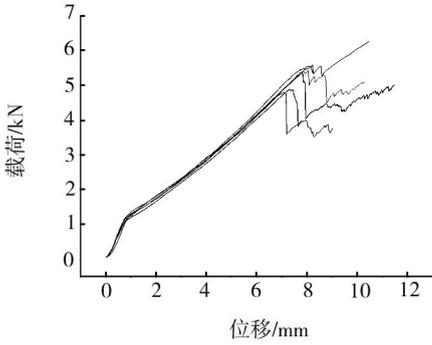
项目	1# 试样		2# 试样		3# 试样		4# 试样	
	用胶量/g	拉脱力/N	用胶量/g	拉脱力/N	用胶量/g	拉脱力/N	用胶量/g	拉脱力/N
平均值	6.75	5064	4.42	3457	5.13	5390	12.26	4271
离散系数	2.38%	4.58%	4.83%	3.55%	4.99%	9.87%	8.89%	17.5%



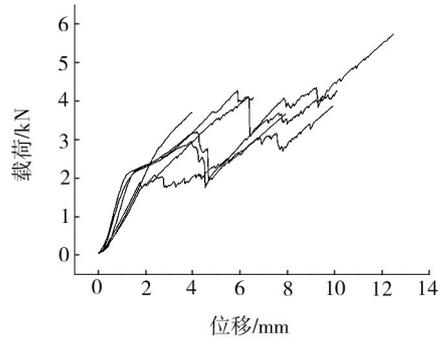
(a) 1#试样



(b) 2#试样



(c) 3#试样



(d) 4#试样

图4 不同用胶量的 M5 埋件拉脱载荷—位移曲线

Fig.4 M5 insert pull-out load-displacement curves with different foaming resin quantity

经分析认为,主要原因是发泡胶的填充要求不规范,填充点距离埋件中心的距离不完全一致。相反,优化发泡胶的填充方式,如3#试样,既可降低结构质量,又能提高埋件的力学性能指标。

2.4 蜂窝-埋件高度阶差的影响

蜂窝-埋件高度阶差指蜂窝芯厚度与埋件高度的差值。该参数对埋件区域平面度及拉脱力的影响见

表4。从测试结果来看,埋件与蜂窝高度阶差在0.15~0.40 mm,埋件所能承受的拉脱力数值变化不大,最大相差不到10%,但阶差为0.30~0.35 mm即两层胶膜厚度时,试样平面度 ≤ 0.1 mm/(任意200 mm \times 200 mm),因此,可根据胶膜厚度控制蜂窝与埋件高度阶差。

表4 高度阶差对埋件拉脱力的影响

Tab.4 Results of M5 inserts pull-out experiments on height steps

项目	0.15~0.20 mm		0.20~0.25 mm		0.25~0.30 mm		0.30~0.35 mm		0.35~0.40 mm	
	平面度/mm	拉脱力/N								
平均值	+0.17	5693	+0.14	5691	+0.11	5536	+0.06	6035	-0.08	6059
离散系数	4.4%	8.4%	3.3%	7.7%	3.6%	3.5%	3.4%	2.9%	4.6%	3.8%

3 结论

(1)测试夹具的加载口应位于试样的应力平缓区,对于M5埋件,加载口孔径应为100 mm较宜,试样平面尺寸应达到加载口孔径2倍以上(含)。

(2)对于0.15 mm厚胶膜,埋件比蜂窝芯低0.15~0.40 mm时,对埋件拉脱力的影响在10%以内。阶差为0.30~0.35 mm,蜂窝夹层试样表面平整。

(3)埋件周围发泡胶填充量采用本文2.3的方案3可替代目前卫星中常用的填充方法,所填发泡胶质量轻,埋件抗拉脱性能高。

(4)对于J-47D发泡胶,按本文 T_1 后加气压,同时卸真空,埋件所能承受的拉脱力比 T_2 后加气压,同时卸真空高;固化全过程抽真空的试样,埋件区域抗拉脱性能低且离散性大。

参考文献

- [1] 沃西源,等. 蜂窝夹层结构复合材料特性及破坏模式分析[J]. 航天返回与遥感, 2005,26(4):46
- [2] 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

(编辑 任涛)