

航空蜂窝夹层结构预埋及力学性能评估分析*

Performance Evaluation and Analysis of Honeycomb Sandwich Structure Embedded Part

中航复合材料有限责任公司 王清明 申学明 曹正华

[摘要] 比较了不同预埋材料及不同预埋件尺寸蜂窝夹层板结构贯通螺栓连接剪切力、拉脱力的影响。结果表明,预埋材料的种类对剪切力的影响要大于预埋材料的尺寸;预埋材料的种类及其尺寸对拉脱力的影响均较大。

关键词: 蜂窝夹层结构 剪切力 拉脱力

[ABSTRACT] Honeycomb embedded part joint by bolt is prepared with different materials and designed into different sizes, and the differences of shear and flatwise tensile force of honeycomb embedded parts are compared. The test results indicate that shear force of embedded part material types are more effective than the embedded part size, while flatwise tensile force of the embedded part material type and the embedded part size have the same performance.

Keywords: Honeycomb sandwich structure Shear force Flatwise tensile force

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S2.067

蜂窝夹层结构在飞行器上的运用已有几十年的历史,特别是在欧美等航空工业起步较早的国家,自从蜂窝芯这种仿生材料由英国人发明以来,就被大量运用到飞行器的次承力结构。由于其结构具有比强度高、比模量高,抗冲击性能好,较高的耐疲劳强度等特点^[1],在民用大型客机外表面材料中占据 25% 用量,而在民机整个内表面次承力结构以及旋转翼飞行器外表面则达到了约 90% 的用量。

蜂窝夹层结构一般由上、下面板、蜂窝芯材、粘接层组成。蜂窝夹层结构上下面板一般比较薄,导致蜂窝夹层结构承受集中载荷的能力有限,因此蜂窝夹层结构的连接比较特殊,通常有两大类方法:第一类为方向舵、升降副翼等全高度变截面蜂窝夹芯结构,这类夹层结构作为连接部分的面板均较厚,一般超过 2mm,整个零件与飞行器的连接主要依靠金属或复合材料梁肋类零件,梁肋零件与面板一般采用胶铆接或胶接的方式进行连接,梁肋零件与蜂窝芯材一般采用发泡胶粘接;第二类

为蜂窝夹层板,这类零件的典型特点是上下面板一般不超过 1mm,整个夹层板厚度不超过 30mm,这类蜂窝夹层板的连接通常有两种方法:一是采用硬度较高的致密的金属或非金属预埋件作为连接的传力点,二是采用标准的金属嵌件,通过后期嵌入的形式作为连接的传力点。

在国外,蜂窝夹层板的连接已经非常成熟,通常采用嵌件进行连接,图 1 为国外某公司几种不同的嵌件结构形式。

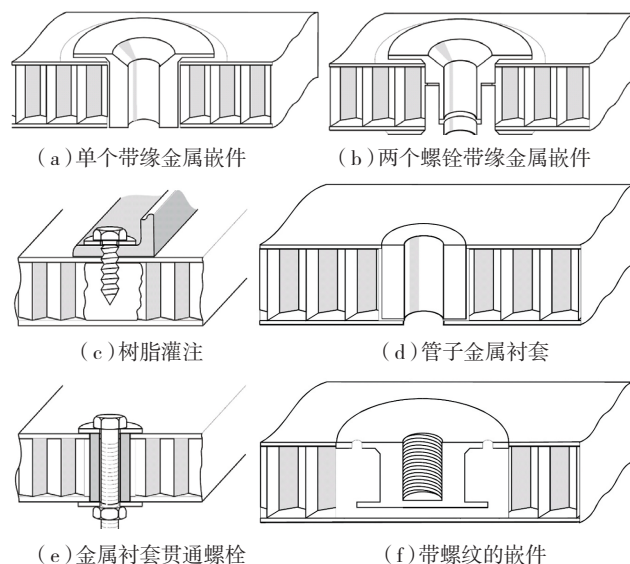


图1 国外某公司嵌件结构形式

Fig.1 Embedded part configurations of external company

国内很多学者对夹层结构的预埋及螺栓贯通连接进行了理论分析和试验验证,航天系统还制定了蜂窝夹层结构用镶嵌件通用规范,如《QJ 3296 蜂窝夹层结构用镶嵌件》航天行业标准。

国内外对夹层结构的连接已有较多的研究,但预埋材料材质较为单一,并且研究主要集中在预埋的结构形式。本文针对第二类蜂窝夹层板,采用了铝合金、碳纤维复合材料层压板、J-118 发泡胶、高密度 PMI 泡沫作为预埋件,研究了不同材料、不同尺寸预埋件对蜂窝夹层板结构贯通螺栓连接剪切力、拉脱力的影响,为国内预埋材料及预埋件尺寸的选择和实际应用提供一定的参考。

* 北京市科学技术委员会(Z111100074111001)资助。

1 研究方案综述

夹层结构采用螺栓贯通连接,螺栓受力可简单分解为剪切力和轴向拉伸力,因此采用螺栓贯通连接的夹层结构受力可分解为剪切力和孔轴向的拉脱力,针对夹层结构螺栓贯通连接的受力形式,确定夹层结构预埋评估可通过评估预埋处夹层结构承受的剪切力和拉脱力。

1.1 夹层结构材料及预埋件尺寸选择

夹层结构面板材料采用 T300/QY 9916-2 碳纤维布预浸料,夹芯材料选用规格为 NRH-2-80(0.08)、厚度为 $12^{+0.1}_0$ mm 的芳纶纸蜂窝芯材。考虑到预埋件高度与夹层结构的匹配性,每种预埋件的厚度为 $12^{0}_{-0.1}$ mm;预埋件与面板材料粘接选择 J-116B 高温固化结构胶粘剂,面板与芯材粘接选用 J-116A 高温固化结构胶粘剂;预埋件与夹芯材料的粘接选用 J-118 结构发泡用胶粘剂;预埋件材料及尺寸见表 1。

表1 预埋件尺寸设计

预埋件材料	铝合金	碳纤维层压板	J-118 发泡胶	PMI 泡沫
预埋件尺寸/mm	15×15	15×15	15×15	15×15
	25×25	25×25	25×25	25×25
	35×35	35×35	35×35	35×35

1.2 剪切力测试试验方案

本文结合蜂窝芯材及夹层结构拉伸剪切测试方法,将同种预埋材料相同预埋件尺寸的两个试件用螺栓贯通连接,在每个试件的另一端连接加载拉头对连接处的剪切力进行测试(见图 2),测试在万能拉力试验机上进行。

1.2.1 剪切力试件

结合蜂窝芯材及夹层结构拉伸剪切测试方法设计了如下剪切力试件;单个试件尺寸 100mm(长)×50mm(宽)×12.8mm(厚度);其中夹芯材料厚度为 $12^{+0.1}_0$ mm,密度为 80kg/m^3 ;面板材料厚度为碳纤维层压板,厚度为 0.4mm,由两层厚度 0.2mm 的平纹碳纤维布预浸料固化而成。试件与加载拉头连接的地方采用 J-118 结构用发泡胶粘剂填充,并制连接孔;每个试件在预埋件中心位置制直径为 6mm 的连接孔,孔与螺钉选用过度配合;每种预埋件边缘距夹层结构底部边缘为 15mm。每种试件的示意图如图 3 所示。

1.2.2 剪切力测试方法

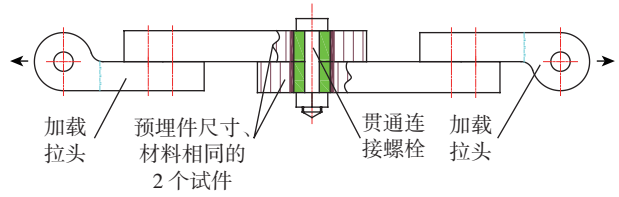


图2 剪切测试方案

Fig.2 Scheme of shear test

剪切力测试方法参照 GB/T 1455 夹层结构剪切性能试验方法,加载速度为 0.5~1.0mm/min,本文选择加载速度为 1.0mm/min。

1.2.3 剪切力测试结果

为了充分展现不同材料、不同预埋件尺寸对蜂窝夹层板结构螺栓贯通连接性能的区别,测试结果主要记录试样破坏时的最大力值,同时也记录每个试样的破坏模式。

1.3 拉脱试验

本文设计了如图 4 所示的拉脱力测试方案,将夹层结构用加载盖板和加载底板夹持在中间,加载盖板和加载底板用螺栓连接,预埋处贯通加载螺栓,通过拉伸加载螺栓及下底板对拉脱力进行测试,测试在万能拉力试验机上进行。

1.3.1 拉脱力试件

单个试件尺寸 100mm(长)×100mm(宽)×12.8mm(厚度);其中夹芯材料厚度为 $12^{+0.1}_0$ mm,密度为 80kg/m^3 ;面板材料厚度为碳纤维层压板,厚度为 0.4mm,由两层厚度 0.2mm 的平纹碳纤维布预浸料固化而成。每个试件在预埋件中心位置制直径为 6mm 的连接孔,孔与螺钉选用过度配合;每种预埋件处于试件的中心位置。每种试件的示意图如图 5 所示。

1.3.2 拉脱力测试方法

拉脱测试方法参照 GB/T 1452 夹层结构平拉强度

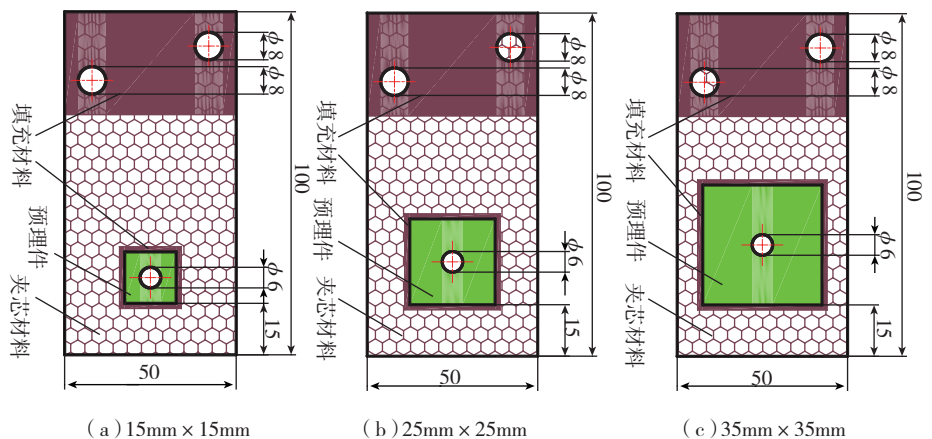


图3 剪切测试试件

Fig.3 Embedded part for shear test

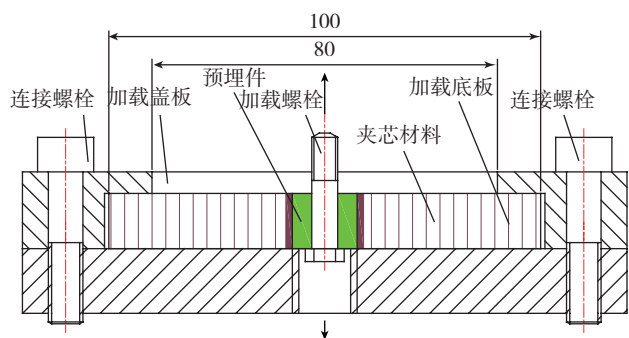


图4 拉脱测试方案
Fig.4 Scheme of flatwise tensile test

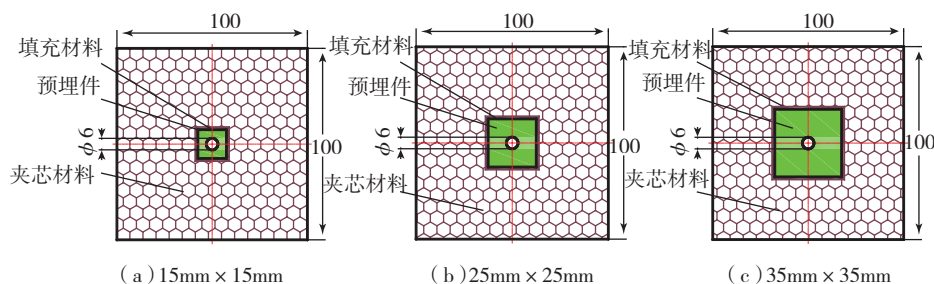


图5 拉脱测试试件
Fig.5 Embedded part for flatwise tensile test

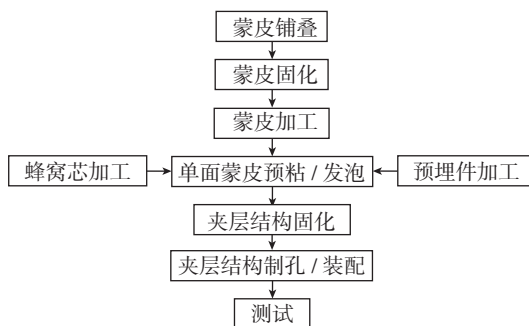


图6 制造流程图
Fig.6 Flow chart of manufacturing

试验方法,加载速度为 1~2mm/min,本文选择加载速度为 1mm/min。

1.3.3 拉脱力测试结果

为了充分展现不同材料、不同预埋件尺寸对蜂窝夹层板结构螺栓贯通连接性能的区别,测试结果主要记录试样破坏时的最大力值,同时也记录每个试样的破坏模式。

2 结果分析

按照研究方案规定的材料采用如图 6 所示流程进行了试件制造。

按照研究方案的规定对试件进行了测试,总体上 PMI 和 J-118 发泡胶作为预埋件,其剪切力和拉脱力与预埋件尺寸相关性不大;铝合金和碳纤维复合材料层压板作为预埋件,其剪切力和拉脱力与预埋件尺寸有较大关系。各种预埋材料及各种尺寸预埋件的破坏模式如表 2 及图 7 所示。

2.1 剪切测试结果分析

综合以上及图 8 不同材料及尺寸预埋件剪切力测试结果可以看出:

PMI 和 J-118 发泡胶这类低密度材料预埋件剪切力主要与材料相关,与预埋件尺寸大小相关性较小;这与试件的破坏模式相一致,PMI 和 J-118 发泡胶的剪切测试的破坏模式是螺栓倾斜,说明这类材料硬度小,承受集中载荷能力差,与面板粘接后不足抵抗测试的集中载荷,因此,其预埋件剪切力与材料相关性大于尺寸相关性。

铝合金和碳纤维层压板这类密度较高的材料作为

表2 破坏模式

剪切测试		拉脱测试	
预埋材料尺寸/mm	破坏模式	预埋材料尺寸/mm	破坏模式
铝合金 15×15	蜂窝芯失稳	铝合金 15×15	夹层结构失稳
铝合金 25×25	蜂窝芯失稳	铝合金 25×25	夹层结构失稳
铝合金 35×35	蜂窝芯失稳	铝合金 35×35	夹层结构失稳
碳纤维层压板 15×15	蜂窝芯失稳	碳纤维层压板 15×15	夹层结构失稳
碳纤维层压板 25×25	面板断裂	碳纤维层压板 25×25	夹层结构失稳
碳纤维层压板 35×35	蜂窝芯失稳	碳纤维层压板 35×35	夹层结构失稳
J-118 发泡胶 15×15	螺栓倾斜	J-118 发泡胶 15×15	螺栓嵌入
J-118 发泡胶 25×25	螺栓倾斜	J-118 发泡胶 25×25	螺栓嵌入
J-118 发泡胶 35×35	螺栓倾斜	J-118 发泡胶 35×35	螺栓嵌入
PMI 泡沫 15×15	螺栓倾斜	PMI 泡沫 15×15	螺栓嵌入
PMI 泡沫 25×25	螺栓倾斜	PMI 泡沫 25×25	螺栓嵌入
PMI 泡沫 35×35	螺栓倾斜	PMI 泡沫 35×35	螺栓嵌入

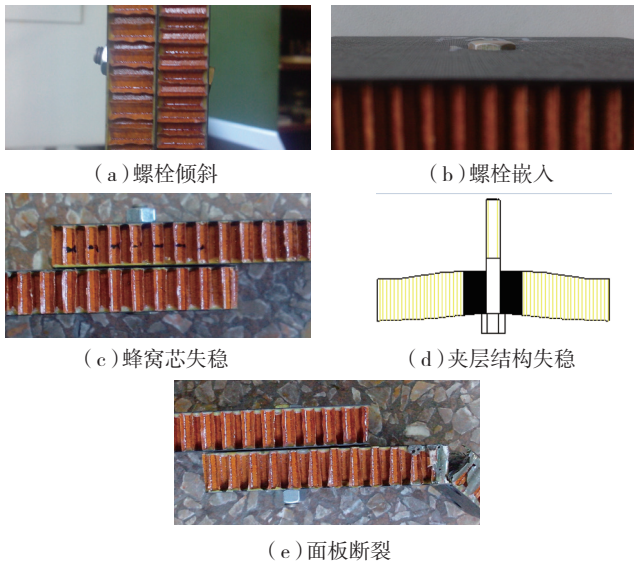


图7 各种破坏模式图形
Fig.7 Breakage patterns

预埋件,其剪切力与材料的相关性小于与预埋件尺寸的相关性。总体趋势为预埋件尺寸越小剪切力越大。受水平限制,该结果的原因有待进一步分析或试验验证。

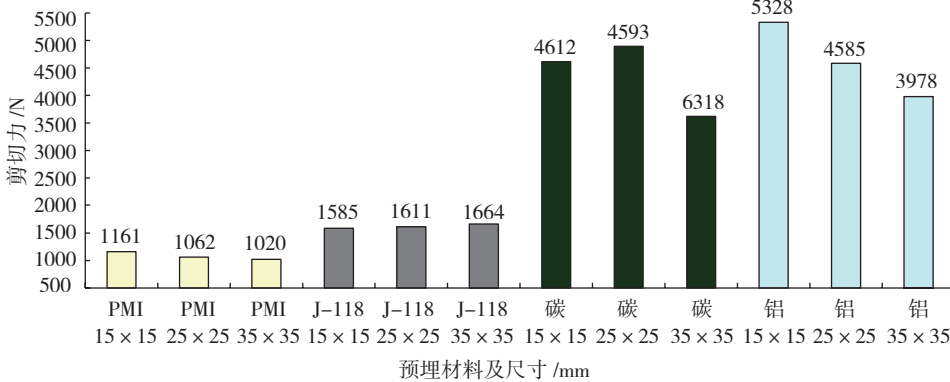


图8 不同材料及尺寸预埋件剪切力测试结果

Fig.8 Test results of shear force different materials and sizes of embedded parts

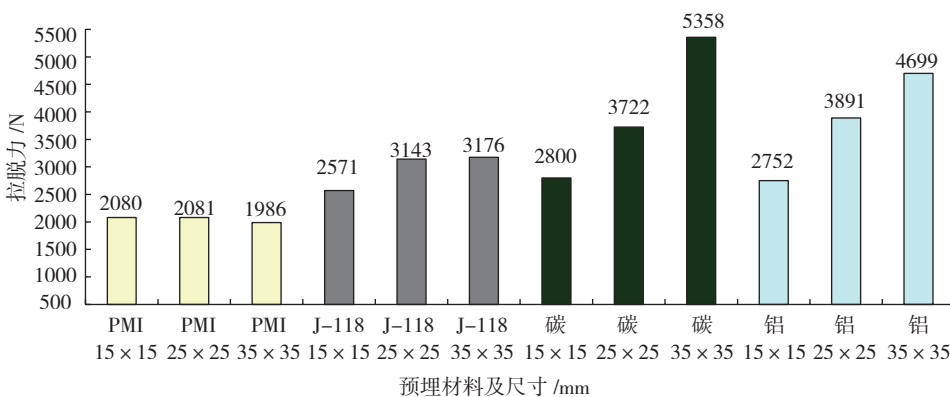


图9 不同材料及尺寸预埋件拉脱力测试结果

Fig.9 Different materials and sizes of embedded parts flatwise tensile force test results

2.2 拉脱测试结果分析

综合以上及图9不同材料及尺寸预埋件拉脱力测试结果可以看出:

PMI泡沫和J-118发泡胶这类低密度材料预埋件拉脱力与材料相关性大于尺寸相关性;这与测试结果的破坏模式也是相一致的,PMI泡沫和J-118发泡胶拉脱测试的破坏模式是螺栓头嵌入,说明这类材料硬度小,承受集中载荷能力差,与面板粘接后不足抵抗测试时螺栓头施加的集中载荷,因此,其强度与材料相关性大于尺寸相关性。

铝合金和碳纤维层压板这类密度较高的材料作为预埋件,拉脱力与材料的相关性小于与预埋件尺寸的相关性。总体趋势为,预埋件尺寸越大拉脱力越大。这类材料的硬度高、抗压强度和刚度是蜂窝芯材的几十上百倍,测试过程中足以承受螺栓头施加的集中载荷,因此,在本试验中拉脱力与尺寸的相关性非常突出,破坏模式均为夹层结构失稳破坏。

3 结论

在夹芯及面板材料、尺寸确定的情况下,本文比较的几种材料及不同尺寸预埋件蜂窝夹层板结构贯通螺栓连接的剪切力、拉脱力测试结果表明:预埋材料的种类对剪切力的影响要大于预埋材料的尺寸;预埋材料的种类及尺寸对拉脱力的影响均较大。

从上述结果可以看出,航空蜂窝夹层结构预埋材料和预埋件尺寸的选择,首先应确定夹层结构芯材的规格、面板材料及厚度;再根据夹层结构连接的性能要求,选择合适的预埋件材料和预埋件尺寸,确保发泡胶等低密度预埋材料能满足螺栓贯通连接性能要求的情况下,不至于选择铝合金作为预埋材料,最终能以最小的质量代价实现满足设计的要求。

参考文献

- [1] 沃西源,夏英伟,涂彬.蜂窝夹层结构复合材料特性及破坏模式分析.航天返回与遥感,2005,26(4):45-49. (责编 玲犀)