

新型复合材料 π 型接头弯曲性能

张涛¹ 张东华² 王国勇¹ 李丽英¹ 许亚洪¹

(1 航天特种材料及工艺技术研究所,北京 100074)

(2 北京机电工程研究所,北京 100074)

文 摘 针对传统复合材料 π 型接头层间性能薄弱的问题,提出一种新型复合材料 π 型接头结构,并通过预浸料-RTM 成型方法制备出具有不同底板厚度的复合材料接头。对复合材料 π 型接头与同尺寸的铝合金接头进行了弯曲试验,试验结果表明,底板厚度为 6 mm 复合材料接头弯曲强度优于铝合金接头、弯曲刚度与铝合金接头相当,而底板厚度为 8 mm 的复合材料接头弯曲强度逊于铝合金接头、弯曲刚度与铝合金接头相当。

关键词 复合材料, π 型接头, 弯曲性能

中图分类号:TB332

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.04.026

Flexural Property of Novel Composite π -Joint

ZHANG Tao¹ ZHANG Donghua² WANG Guoyong¹ LI Liying¹ XU Yahong¹

(1 Research Institute of Aerospace Special Materials and Processing Technology, Beijing 100074)

(2 Beijing Electro-mechanical Engineering Institute, Beijing 100074)

Abstract Considering the weakness of interlayer in traditional composite π -joints, a novel composite π -joint structure is proposed, and joints with different panel thickness are manufactured by prepreg-RTM method. Flexural experiments are tested on composite and aluminum joints, the results show that the flexural strength of composite joints with 6 mm bottom panel thickness are better than that of aluminum joint, and the flexural stiffness is in the same scale. For the joints with 8 mm bottom panel thickness, the flexural strength of composite joints are less than that of aluminum joint, and the flexural stiffness is also in the same scale.

Key words Composite, π -joint, Flexural property

0 引言

先进复合材料以其高比强、高比模、高破损安全、耐腐蚀、可设计等优点,已发展成为航空航天结构的基本材料之一^[1]。随着新型飞行器对结构轻量化水平要求的不断提高,先进复合材料逐渐扩展应用至高应力水平结构,复合材料整体 π 型接头是这类结构的典型代表,美国 F-35 联合攻击机采用了基于 π 型胶接接头的前机身整体结构^[2]。

传统整体复合材料 π 型接头通常采用两侧“L”型叠层、中间“U”型叠层、下端“一”字型叠层的结构形式,叠层中间为三角填充区,如图 1 所示。在服役过程中, π 型接头承受来自被连接结构的拉伸载荷、剪切载荷以及集中弯矩,研究表明,由于复合材料 π 型接头载荷传递模式为面外传载,在载荷传递过程中,三角填充区周围将产生层间拉伸与层间剪切应力

集中,而复合材料面内强、层间弱的特点决定了该区域成为复合材料 π 型接头的最薄弱之处。因此,由层间应力集中导致的三角填充区分层失效是传统复合材料 π 型接头的重要力学行为特征^[3-6]。

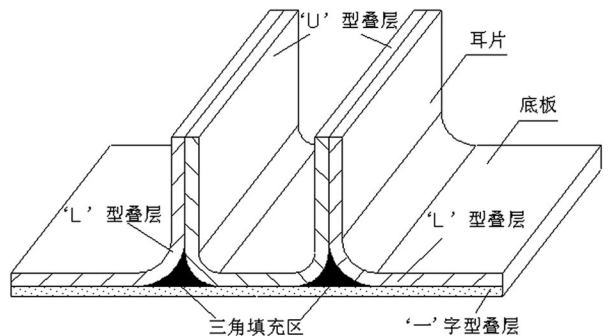


图 1 传统复合材料 π 型接头结构示意图

Fig. 1 Traditional composite π -joint

收稿日期:2015-05-12

作者简介:张涛,1984 年出生,硕士,主要从事复合材料结构设计与制造。E-mail:13911997771@139.com

本文针对传统复合材料 π 型接头转载过程中因三角填充区层间应力集中而导致的接头失效问题,提出了一种新型复合材料 π 型接头的结构形式,通过弯曲试验,对比研究了新型复合材料 π 型接头与相同尺寸铝合金接头的力学性能,并初步分析了接头的失效模式。

1 试验

1.1 试验件设计

新型复合材料 π 型接头采用了一种“骨架-蒙皮”的结构形式,如图 2 所示,其中“骨架”复合材料铺层(即面内方向)与 π 型接头截面平行,承担大部分外载荷,“蒙皮”整体包覆在“骨架”外侧,维持“骨架”结构的整体性与稳定性。与传统复合材料 π 型接头相比,新型复合材料 π 型接头中,“骨架”结构代替了三角填充区,在接头承受拉伸、剪切或弯曲载荷时,复合材料铺层平面与载荷方向平行,弯角处的层间应力转化为面内应力,能够显著提高 π 型接头的载荷传递效率。

按照上述设计思想,确定了接头的几何尺寸:底

板宽度为 180 mm,耳片高度为 50 mm,接头长度为 102 mm,底板厚度为 6 mm 或 8 mm。为平衡 π 型接头底板与耳片刚度,骨架采用 $[45/0/-45/90]_{ns}$ 的铺层形式,蒙皮采用平纹织物铺层 $[(0/90)_r]_n$,其中 n 根据所采用的材料体系以及接头几何尺寸确定。

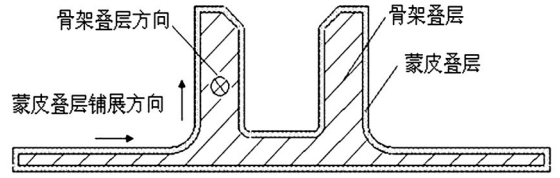
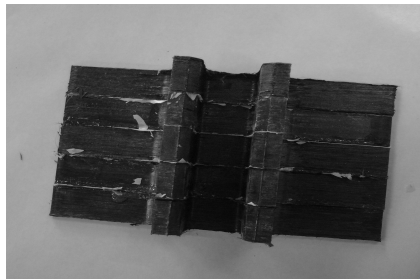


图 2 新型复合材料 π 型接头截面示意图

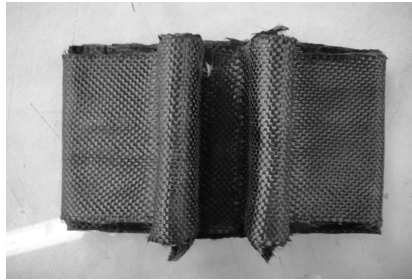
Fig. 2 Novel composite π -joint

1.2 试验件制备

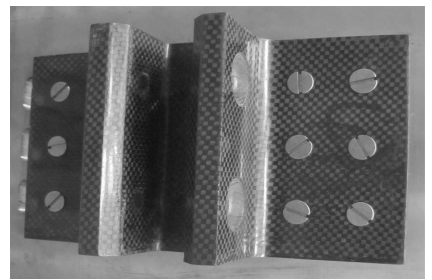
复合材料 π 型接头试验件采用预浸料-RTM 共固化成型工艺方法。骨架采用 T700/9368 预浸料体系,蒙皮采用 G0814/6808 液态成型材料体系。骨架预制体、 π 型接头预制体以及制备出的 π 型接头试验件如图 3 所示。



骨架预制体



π 型接头预制体



π 型接头试验件

图 3 新型复合材料 π 型接头预制体及试验件

Fig. 3 Perform and specimen of the novel composite π -joint

1.3 性能测试

为比较新型复合材料 π 型接头与铝合金接头之间承载能力的差异,通过横向弯曲试验分别对二者抗弯能力进行测试表征。复合材料 π 型采用底板厚度为设计变量,分别设计与制备了底板厚度为 6 和 8 mm 的两种 π 型接头试验件,试验件编号及其对应的结构形式如表 1 所示。作为对照试验件,又分别制备了底板厚度为 6 和 8 mm 的铝合金 π 型接头,编号分别 AL6 和 AL8,接头材料采用 2A12 铝合金。

表 1 π 型接头试验件编号及其对应的结构形式

Tab. 1 Serial numbers of π -joint with different structure

试验件	底板处骨架 厚度/mm	底板处蒙皮 厚度/mm
COM46-1, COM46-2	4	1
COM48	4	2
COM68-1, COM68-2	6	1

试验夹具由接头支座、悬臂梁模拟件以及连接螺栓组成,接头底板通过 12 枚高强钢制沉头螺栓(图 3)连接在接头支座上,耳片通过 2 枚高强沉头螺栓与悬臂梁模拟件连接在一起,其中连接螺栓材质均为 30CrMnSiA。试验过程中,通过试验机压头对悬臂梁模拟件对 π 型接头加载,如图 4 所示。

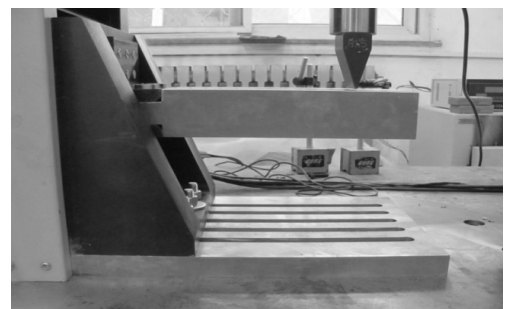


图 4 π 型接头弯曲试验过程

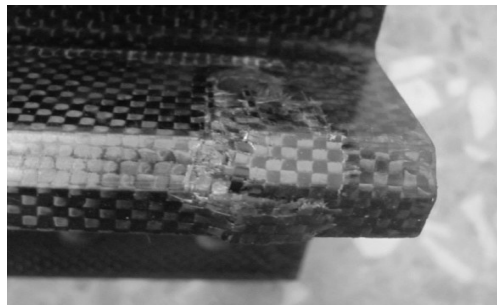
Fig. 4 Flexural testing of π -joint

2 结果与讨论

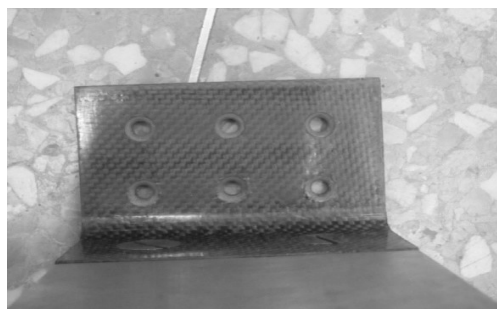
2.1 构型 I 接头

2.1.1 试验结果与失效模式

构型 I 接头的弯曲试验结果为: COM46-1 和 COM46-2 复合材料接头破坏载荷分别为 14.25 和 13.31 kN, AL6 铝合金接头为 10.97 kN, 试验件失效模式见图 5 和图 6。可知, 复合材料接头失效模式为耳片螺栓孔上方蒙皮剪切与分层破坏、底板螺栓孔附件蒙皮分层破坏, 而铝合金接头主要失效模式为耳片与底板之间弯角区域的塑性变形。



(a) 耳片处剪切与分层失效



(b) 底板处蒙皮分层失效

图 5 COM46 接头失效模式

Fig.5 Failure mode of COM46 joint



图 6 COM46 复合材料接头与 AL6 铝合金接头变形情况对比

Fig.6 Deformation mode of COM46 joint and AL6 joint

2.1.2 结果分析

构型 I 接头位移—载荷曲线如图 7 所示。可以看出, 随着载荷值的增加, 复合材料接头的位移—载荷曲线出现了“卸载—加载”的特征, 呈现出渐进分层损伤的失效模式; 铝合金接头加载至最高点后, 位移—载荷曲线出现了明显的塑性屈服平台, 上述现象与试验件宏观失效模式的观测结果一致。从接头的最终破坏载荷情况来看, 复合材料 π 型接头强度较铝合金接头提高 20% ~ 30%, 产生该结果的主要原因是: 结构形式的变化使复合材料 π 型接头在弯角

处的应力模式由层间应力转变为面内应力, 显著提高了该区域的载荷传递效率, 铝合金接头仍存在较大的沿弯角切向的应力集中, 进而导致该区域的塑性屈服失效。

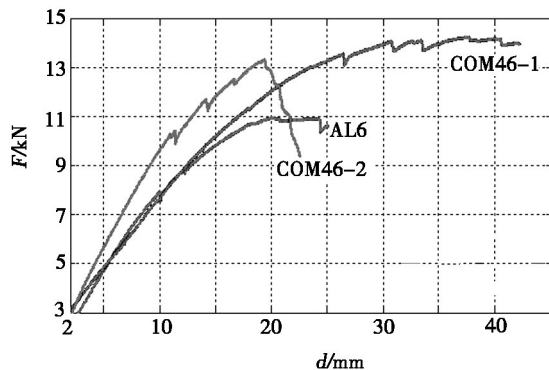


图 7 构型 I 接头位移—载荷曲线

Fig.7 Displacement-loading curves of the structure-I joints

另一方面, 位移—载荷曲线的斜率代表接头的整体弯曲刚度, 为定量的比较复合材料接头与铝合金接头之间刚度, 对位移—载荷曲线的线弹性段(载荷为 5 ~ 10 kN 的曲线段)进行了线性回归, 计算结果见表 2。可以看出, COM46-1 接头与 AL6 接头的斜率相近, 而 COM46-2 接头斜率明显高于前二者, 因此, 复合材料接头弯曲刚度相当于或优于铝合金接头的效果。而造成 COM46-1 与 COM46-2 刚度差异的可能原因是成型工艺或紧固件装配状态的波动。

表 2 载荷—位移曲线线弹性段线性回归计算结果

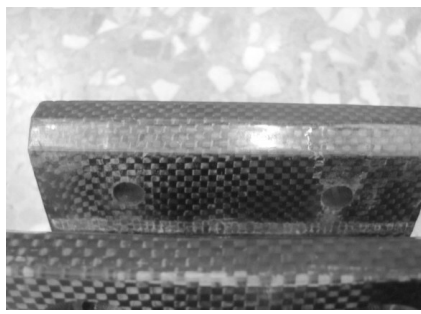
Tab.2 Results of linear regression analysis for displacement-loading curves

试样	计算取值范围/kN	斜率 /kN·mm ⁻¹	截距 /kN	线性度
AL6		0.65	1.60	0.97
COM46-1	5 ~ 10	0.62	1.75	0.99
COM46-2		0.80	1.70	0.98

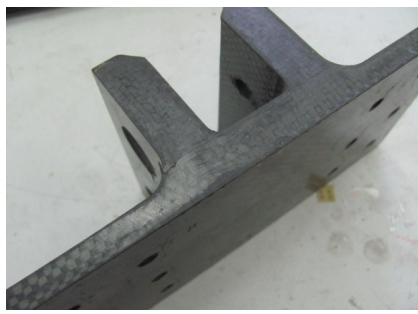
2.2 构型 II 接头

2.2.1 试验结果与失效模式

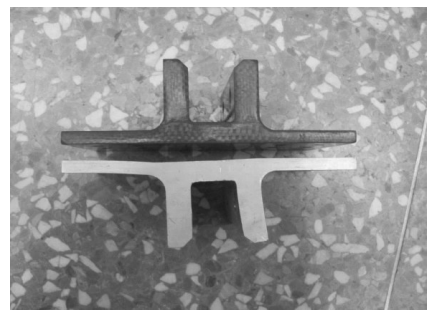
构型 II 接头的弯曲试验结果为: COM48、COM68-1 和 COM68-2 复合材料接头破坏载荷分别为 14.58、15.45 和 13.5 kN, AL8 铝合金接头为 16.28 kN, 试验件失效模式见图 8。可知, COM48 复合材料接头失效模式为螺栓孔附近的剪切及表层蒙皮分层失效, COM68-1 与 COM68-2 复合材料接头表面无明显损伤, 无损检测结果显示为蒙皮与骨架之间的分层是造成接头失效的主要原因, 铝合金接头主要失效模式为耳片与底板之间弯角区域的塑性变形。



(a) COM48 接头



(b) COM68 接头



(c) 两种接头变形情况对比

图 8 两种接头失效及变形情况

Fig. 8 Deformation mode of COM46 joint and AL6 joint

2.2.2 试验结果分析

构型 II 接头位移—载荷曲线如图 9 所示。可以看出,复合材料接头与铝合金接头均出现了一个明显的卸载特征,随着载荷值的增加,铝合金接头表现为非线性强化特性,与 AL6 相比提高约 60%,无明显塑性屈服平台;而复合材料接头则呈现出规则的渐进损伤现象,其主要失效模式为分层模式,与构型 I 具有相似性。从最终破坏载荷情况来看,复合材料接头破坏载荷均低于铝合金接头,降低值约为 5% ~ 17%,该结果表明:随着接头底板厚度的增加,铝合金接头弯角处应力集中得到明显改善,而复合材料接头失效模式与构型 I 相比并未出现明显变化,均有蒙皮分层支配,因此性能变化不明显。

对构型 II 接头位移—载荷曲线的线性回归计算结果见表 3。

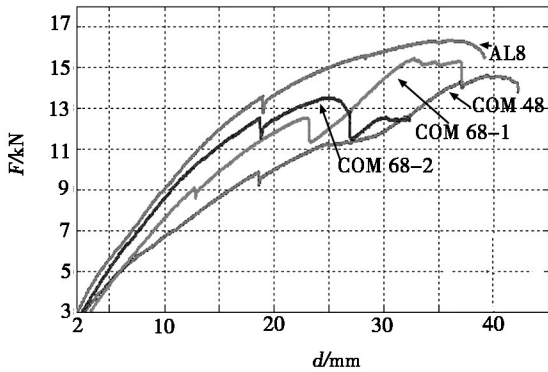


图 9 构型 II 接头位移—载荷曲线

Fig. 9 Displacement-loading curves of the structure-II joints

表 3 载荷—位移曲线线性段线性回归计算结果

Tal. 3 Results of linear regression analysis for displacement-loading curves

试样	计算取值范围/kN	斜率 /kN·mm ⁻¹	截距 /kN	线性度
AL8	5 ~ 10	0.71	2.00	0.98
COM48		0.44	2.40	0.97
COM68-1		0.65	1.90	0.99
COM68-2		0.68	1.70	0.99

图 9 可见,AL8 铝合金接头的斜率最大,COM68—宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第 4 期

1 与 COM68-2 复合材料接头斜率次之,而 COM48 复合材料接头斜率最小,其中 AL8 接头与 COM68 斜率相差不大,而 COM48 接头斜率较其他试验件有明显降低。该结果表明:COM68 接头与 COM48 接头相比,前者骨架底板尺寸较大,刚度较高。因此,骨架结构的尺寸与构型是决定复合材料结构刚度性能的主要因素之一。

3 结论

(1) 针对传统复合材料 π 型接头层间性能薄弱的问题,提出了一种新型复合材料 π 型接头结构,并基于预浸料-RTM 成型方法制备出具有不同结构参数的复合材料接头。

(2) 构型 I 复合材料接头失效模式为耳片及底板螺栓附近剪切与蒙皮分层失效,其强度较同尺寸铝合金接头有较大优势,而刚度与铝合金接头相当。

(3) 构型 II 中 COM48 复合材料接头失效模式为耳片附近螺栓剪切与蒙皮分层失效,其强度与刚度均低于同尺寸铝合金接头;COM68 复合材料接头失效模式为耳片与底板转角区的蒙皮分层失效,其刚度与铝合金接头相当,而强度低于铝合金接头。

参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12
- [2] 赵丽滨, 彭雷, 张健宇, 等. 复合材料 π 接头拉伸力学性能的试验和计算研究[J]. 复合材料学报, 2009, 26(2): 181-186
- [3] 胡孝才, 戴隶. 计算机模拟与复合材料整体化结构的接头设计[J]. 航空制造技术, 2012(3): 44-47
- [4] Meeks C, Greenhalgh E, Falzon B. Stiffener debonding mechanism in post buckled CFRP aerospace plates[J]. Composites: Part A, 2005, 36(7): 934-946
- [5] Cosentino E, Weaver P M. Nonlinear analytical approach for preliminary sizing of discrete composite stringer terminations [J]. AIAA Journal, 2009, 47(3): 606-617
- [6] Heimbs S, Nogueira A C, Hombergmeier E, et al. Wolfrum. Failure behaviour of composite T-joints with novel metallic arrow-pin reinforcement [J]. Composite Structures, 2013, 110: 16-28

(编辑 任涛)