

不同复合材料机械连接强度性能对比分析

杨梦粤, 李 磊

中国飞机强度研究所, 陕西 西安
Email: 277299329@qq.com

收稿日期: 2020年12月7日; 录用日期: 2021年1月15日; 发布日期: 2021年1月22日

摘 要

本文开展了不同复合材料体系、不同铺层比例复合材料层压板单钉连接性能的试验研究, 设计了3种典型铺层的碳纤维单向带复合材料层压板试样以及2种(芳纶织物、玻璃布织物)织物复合材料层压板试样, 获取了铺层方式对连接性能的影响规律, 研究发现芳纶织物具有较好的单钉双剪挤压性能, 而玻璃布织物具有较好的单钉单剪挤压性能。

关键词

铺层比例, 复合材料, 单钉单剪, 单钉双剪, 挤压强度

Comparative Analysis of Mechanical Joint Strength of Different Composite Materials

Mengyue Yang, Lei Li

Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an Shaanxi
Email: 277299329@qq.com

Received: Dec. 7th, 2020; accepted: Jan. 15th, 2021; published: Jan. 22nd, 2021

Abstract

The experimental study on the single nail connection performance of composite laminates with different composite systems and different ply ratios was carried out. Three typical laminates of

carbon fiber unidirectional belt composite and two kinds of laminates (aramid fabric and glass fabric) were designed. The influence of ply methods on the connection performance was obtained. The results show that the fabric has better single nail and double shear extrusion performance, while the glass fabric has better single nail and single shear extrusion performance.

Keywords

Ply Ratio, Composite, Single Nail Single Shear, Single Nail Double Shear, Extrusion Strength Establishment

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

复合材料具有优异的比强度、比刚度性能, 在飞机上的运用越来越广泛, 已逐步从次承力结构运用到主承力结构。在飞机结构中连接是必不可少的, 目前常用的连接形式包括胶接连接和机械连接。机械连接因具有拆卸方便、连接可靠等优点而被大量运用于飞机复合材料结构中。在飞机复合材料结构设计时, 复合材料体系的选择以及铺层方式的优化设计是不得不考虑的问题, 其对复合材料机械连接结构性能的影响程度是国内外飞机设计人员一直关注的焦点。

复合材料机械连接形式很多, 包括单剪搭接、双剪搭接等, 国内外大量学者对不同连接形式的强度性能开展了研究。Gray [1]等研究了接头厚度以及二次弯曲对复合材料单剪搭接方式强度、刚度性能的影响, 发现接头厚度对连接强度具有较大影响。Cooper [2]、Wang [3]等研究了孔端距以及孔间距对单钉双剪连接复合材料结构强度性能的影响。顾亦磊[4]等采用试验研究了搭接方式以及紧固件材料对多钉连接复合材料结构强度性能的影响, 宋恩鹏[5]等研究了连接材料刚度对连接性能的影响。蒋持平[6]、徐耀玲[7]、徐忠岩[8]等对多钉连接结构的强度性能进行了分析和试验研究。但对于不同复合材料体系对机械连接性能影响的研究鲜有报道。

本文通过设计不同材料体系(碳纤维单向带、玻璃纤维织物以及芳纶纤维织物)以及不同铺层方式的单钉连接形式试样, 开展单钉单剪以及单钉双剪试验研究, 通过试验对比获取不同材料体系以及铺层比例对单钉连接形式复合材料结构强度性能的影响, 给飞机结构设计人员提供参考。

2. 试样与方法

2.1. 试样

本文共设计了两类复合材料单钉连接形式试样, 分别为单钉单剪试样和单钉双剪试样, 试样示意图如图 1 所示。单钉双剪试样材料为 T800 级碳纤维单向带复合材料、玻璃布织物材料以及芳纶织物材料, 其中采用碳纤维单向带复合材料设计了 3 种典型铺层比例试样, 共计加工了 5 种不同铺层比例以及不同材料的试样, 如表 1 所示。单钉单剪试样为碳纤维单向带 B 铺层和 C 铺层层压板分别与玻璃布织物材料以及芳纶织物材料层压板连接构成, 共计 5 类试样。

单钉单剪连接试样和单钉双剪连接试样根据 ASTM D5961 [9]要求加工。

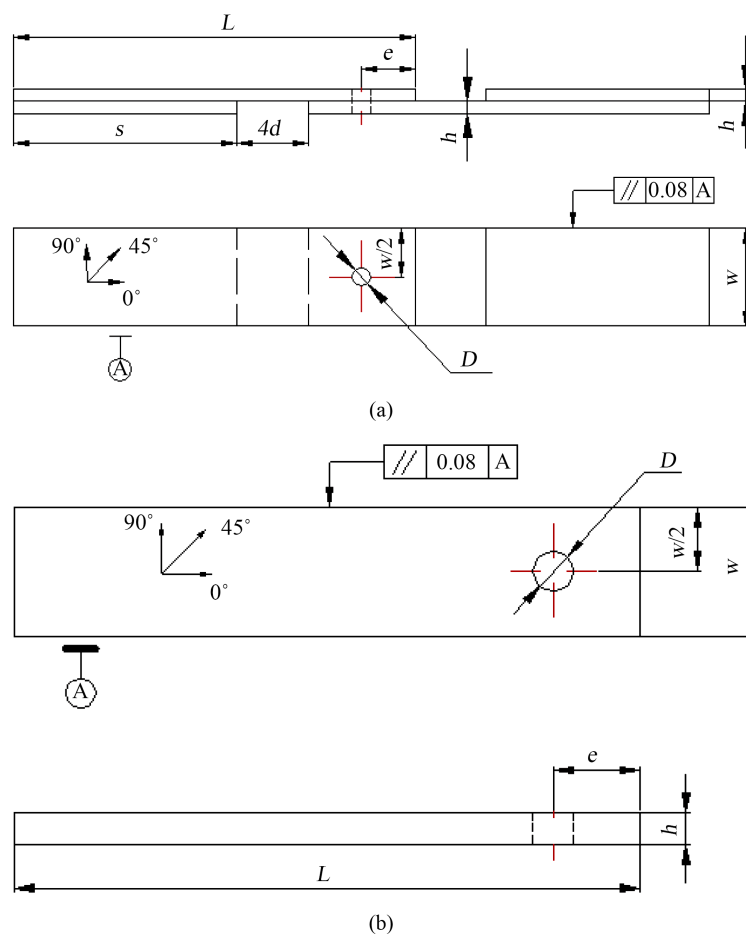


Figure 1. Schematic diagram of sample. (a) Schematic diagram of single nail and single shear specimen; (b) Schematic diagram of single nail double shear specimen

图 1. 试样示意图。(a) 单钉单剪试样示意图；(b) 单钉双剪试样示意图

Table 1. Ply ratio and thickness of specimens

表 1. 试样的铺层比例和厚度

编号	材料及铺层	铺层比例 $[0/\pm 45/90]/\%$	厚度/mm
A	碳纤维单向带 A 铺层	(30/60/10)	3.425
B	碳纤维单向带 B 铺层	(40/50/10)	3.425
C	碳纤维单向带 C 铺层	(50/40/10)	3.973
D	芳纶织物	/	2.796
E	玻璃布织物	/	3.000

2.2. 试验方法

复合材料层压板单钉双剪试验按照 ASTM D 5961 “聚合物基复合材料层压板挤压响应的标准试验方法”的方法 A 实施。采用引伸计测量孔挤压变形量，试验前将试样安装于夹具中，并将试样与夹具组合体对中夹持于试验机，如图 2 所示。采用 2 mm/min 的加载速率连续加载，当载荷下降量超过最大载荷的 30% 时或当孔发生破坏并不产生过度挤压时，停止试验，记录破坏载荷及失效形式。

复合材料层压板单钉单剪试验按照 ASTM D 5961 “聚合物基复合材料层压板挤压响应的标准试验方法”的方法 B 实施。试验前将试样对中夹持于试验机夹头内, 如图 3 所示。与单钉双剪试验类似采用引伸计测量孔挤压变形量, 其余试验方法步骤同单钉双剪试验。

本文设计的所有试验均在室温大气环境下进行。

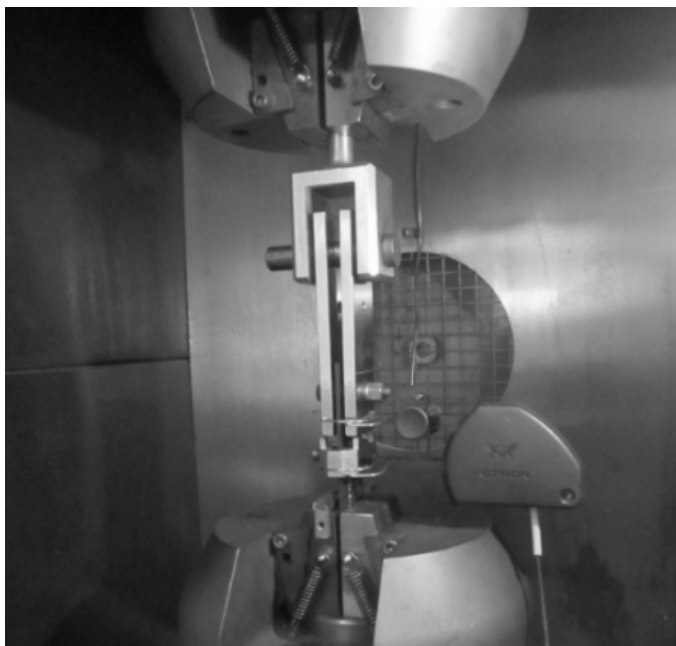


Figure 2. Schematic diagram of single nail double shear test
图 2. 单钉双剪试验示意图

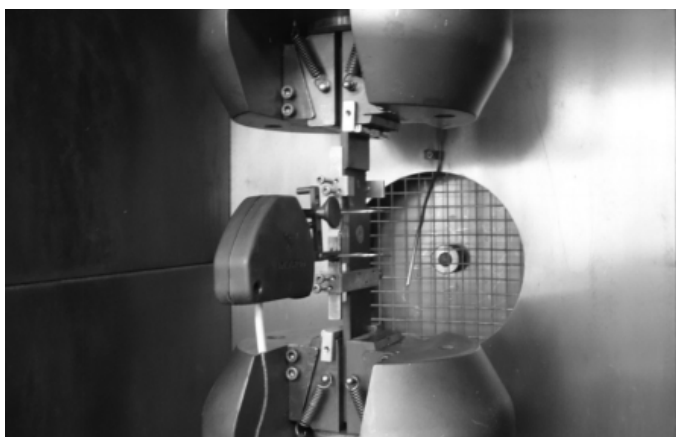


Figure 3. Schematic diagram of single nail and single shear test
图 3. 单钉单剪试验示意图

3. 试验结果与分析

3.1. 不同材料单钉双剪性能对比分析

本文共进行了 5 种不同材料以及铺层形式的单钉双剪挤压性能试验, 其典型破坏模式均为复合材料层压板孔处挤压破坏, 如图 4 所示。

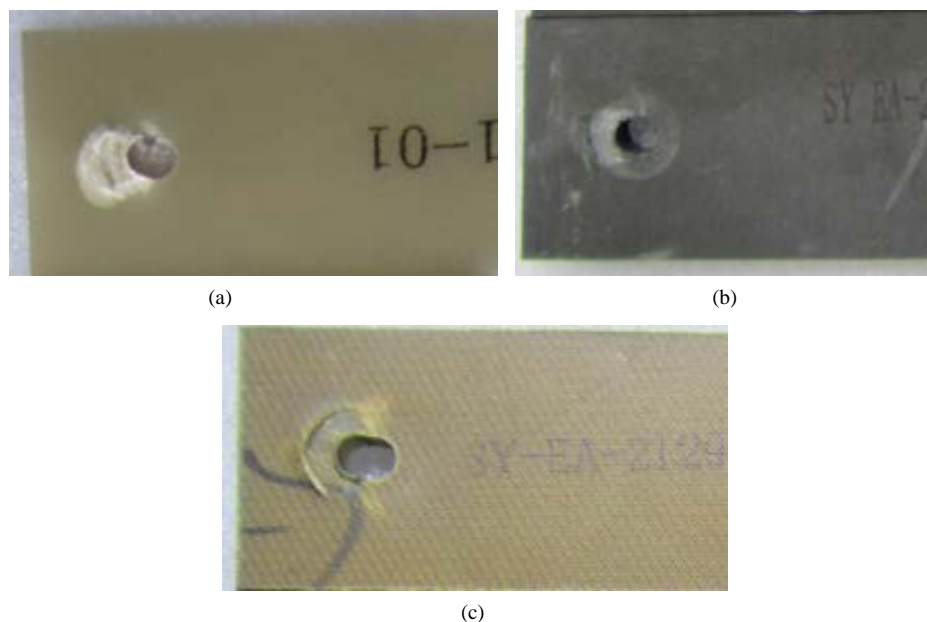


Figure 4. Typical failure mode of single screw and double shear. (a) Glass cloth fabric; (b) Carbon fiber unidirectional tape a ply; (c) Aramid fabric

图 4. 单钉双剪典型失效模式。(a)玻璃布织物；(b)碳纤维单向带 A 铺层；(c) 芳纶织物

图 5 给出了不同材料以及不同铺层形式下复合材料层压板极限挤压强度和 2% 偏移挤压强度性能对比。试验代号 A、B 和 C 为 T800 级碳纤维单向带 A 铺层、B 铺层和 C 铺层试验结果，通过对比发现随着 $\pm 45^\circ$ 层比例的降低，复合材料层压板极限挤压强度也降低，2% 偏移挤压强度变化不大。表明适当增加 45° 层的铺层比例可提升挤压强度性能。原因在于螺栓挤压过程中，复合材料层压板孔处承受较大比例的剪应力，适当增加 45° 层铺层比例可有效抵抗剪切变形，提升承载能力。

试验代号 D、E 为芳纶织物、玻璃布织物试样的试验结果，通过对比发现芳纶织物材料极限挤压强度性能最高，比玻璃布织物极限挤压强度高 5.74%，表明芳纶织物复合材料层压板具有较好的单钉双剪挤压性能。通过 2% 偏移挤压强度性能对比发现玻璃布织物性能略高，表明玻璃布织物具有更好的抗挤压能力。

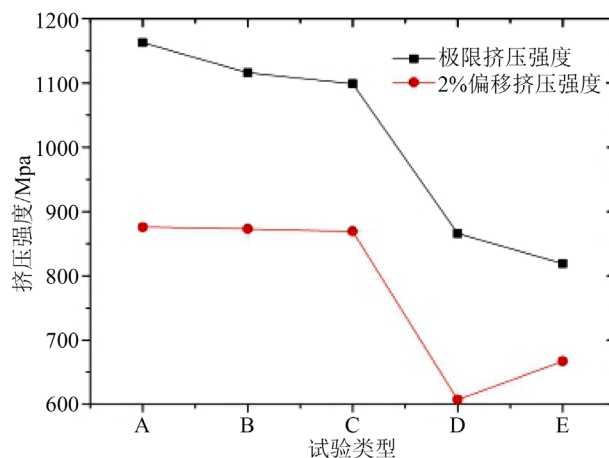


Figure 5. Extrusion strength of different materials/ply forms

图 5. 不同材料/铺层形式下的挤压强度

3.2. 不同材料单钉单剪性能对比分析

本次试验进行了 4 类单钉单剪试验, 分别是碳纤单向带 B 铺层层压板、C 铺层层压板和芳纶织物、玻璃布织物层压板机械连接。其典型破坏模式为钉头侧复合材料层压板挤压破坏和钉断裂与挤压破坏的混合失效模式, 如图 6 所示。



Figure 6. Typical failure mode of single nail and single shear
图 6. 单钉单剪典型失效模式

图 7 给出了不同材料以及不同铺层复合材料层压板单钉单剪试验结果。通过对比相同铺层层压板和不同材料层压板机械连接性能发现玻璃布织物和碳纤维单向带层压板机械连接形式具有更高的挤压强度性能。通过相同织物材料不同铺层碳纤维单向带复合材料机械连接性能对比发现, 与 B 铺层连接的织物材料具有更高的挤压强度性能, 原因在于 B 铺层含 $\pm 45^\circ$ 层铺层比例更高。

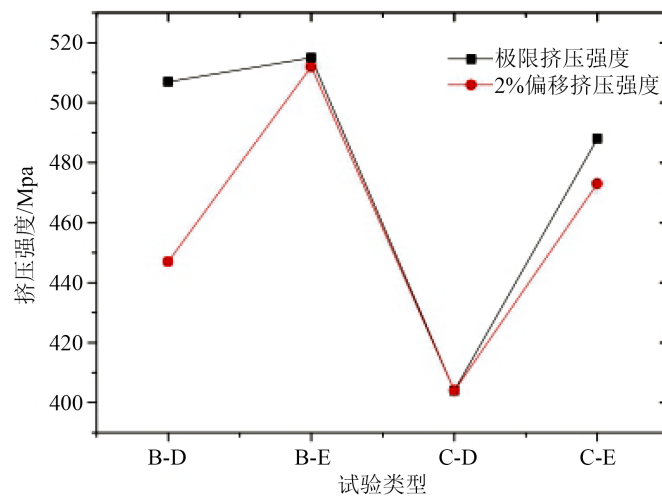


Figure 7. Comparison of extrusion strength under different material/ply combinations
图 7. 不同材料/铺层组合下的挤压强度对比

4. 结论

本文通过试验研究了不同材料以及不同铺层形式下的单钉单剪和单钉双剪挤压强度性能, 得到以下结论:

- 1) 随着 $\pm 45^\circ$ 层比例提高, 复合材料层压板挤压强度性能提升。

- 2) 芳纶织物、玻璃布织物中芳纶织物的单钉双剪挤压性能更好。
- 3) 两种材料中, 玻璃布织物复合材料层压板具有更好的单钉单剪挤压性能。

参考文献

- [1] Gray, P.J. and McCarthy, C.T. (2011) A Highly Efficient User-Defined Finite Element for Load Distribution Analysis. *Composites Science and Technology*, **71**, 1517-1527. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.06.011>
- [2] Ataş, A. and Soutis, C. (2013) Subcritical Damage Mechanisms of Bolted Joints in CFRP Composite Laminates. *Composites Part B: Engineering*, **54**, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.071>
- [3] Ahmad, H., Crocombe, A.D. and Smith, P.A. (2014) Strength Prediction in CFRP Woven Lamina Bolted Double-Lap Joints under Quasi-Static Loading Using XFEM. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **56**, 192-202. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.10.012>
- [4] 顾亦磊. 复合材料机械连接强度分析及影响因素研究[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [5] 宋恩鹏, 刘文斑, 谢鸣九, 等. 刚度比对复合材料多钉连接钉载分配影响研究[J]. 飞机设计, 2005, 12(4): 29-32.
- [6] 蒋持平, 张行, 任炳义, 等. 有限尺寸多钉连接件钉转载荷计算的解析方法[J]. 力学学报, 1995, 27(2): 198-212.
- [7] 徐耀玲, 张振先. 多钉连接复合材料板钉转载荷的计算[J]. 燕山大学学报, 2005, 29(2): 178-181.
- [8] 徐忠岩, 王立清, 任静, 等. 复合材料多钉连接设计、分析与试验技术研究[C]//中国航空学会. 第27届全国直升机年会. 南京: 中国航空学会, 2011: 351-354.
- [9] ASTM Committee D30 on Composite Materials (2017) Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials: ASTM D5961-17. ASTM International: West Conshohocken, PA.