

# Influence of Ply Ratio and Thickness on the Connection Strength of Different Composite Structures

Pengfei Cheng, Shengchun Yang, Lei Li, Jiahui Xie, Huafeng Xiong

Mechanical Property Evaluation and Testing Center, China Aircraft Strength Research Institute, Xi'an Shaanxi  
Email: 244980283@qq.com

Received: May 5<sup>th</sup>, 2020; accepted: May 19<sup>th</sup>, 2020; published: May 26<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

In this paper, the experimental study on the connection strength of composite laminates with different connection forms is carried out, and the effects of the ply ratio, thickness, hygrothermal environment and connection forms on the connection strength of composite laminates are obtained. The results show: For the single nail double shear connection, when ply ratio of  $\pm 45^\circ$  plies is in a certain range, changing the ratio of  $\pm 45^\circ$  plies,  $0^\circ$  plies and  $90^\circ$  plies properly will not have a great impact on the connection strength of composite laminates; For the single nail single shear connection, when the ratio of  $\pm 45^\circ$  plies is in a certain range, the ply ratio is not the main factor affecting the connection strength, but the thickness of laminate has an important influence on the connection strength.

## Keywords

Composite Material, Ply Ratio, Connection Strength

# 铺层和厚度对不同复材结构连接强度的影响

程鹏飞, 杨胜春, 李磊, 谢佳卉, 熊华峰

中国飞机强度研究所力学性能评定与测试中心, 陕西 西安  
Email: 244980283@qq.com

收稿日期: 2020年5月5日; 录用日期: 2020年5月19日; 发布日期: 2020年5月26日

## 摘要

本文对复合材料层压板进行了不同连接形式的连接强度试验研究, 获得了铺层比例、厚度、湿热环境和

连接形式对复合材料层压板连接强度的影响规律。研究表明：对于单钉双剪连接形式，当 $\pm 45^\circ$ 铺层比例处于一定范围内时，适当改变 $\pm 45^\circ$ 、 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 铺层的比例并不会对复合材料层压板的连接强度产生较大的影响；对于单钉单剪连接形式，当 $\pm 45^\circ$ 铺层比例处于一定范围内时，铺层比例并不是影响连接强度的主要因素，层压板厚度对连接强度有重要影响。

## 关键词

复合材料，铺层比例，连接强度

Copyright © 2020 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

虽然目前复合材料胶接连接技术已经非常成熟，且比机械连接更加有效，但机械连接仍然是飞机复合材料结构的一种主要连接方式之一。对于飞机上需要检修或更换的复合材料结构，必须采用机械连接形式。此外胶接连接往往缺少结构裕度，且对制造缺陷高度敏感，因此在高要求和高安全设定的应用中，例如飞机的主要结构元件，特别是大型民机，宁可采用机械连接也不采用胶接连接[1]。因此复合材料结构的机械连接形式仍然是国内外学者研究的热点。

在铺层对复合材料连接的影响研究中，Sun 通过对复合材料层板钉孔接触区域的损伤情况研究发现： $0^\circ$ 层在挤压破坏发生的初始阶段起重要作用[2] [3]。I. D. G. A. Subagia 通过试验分析了四种不同铺层结构对挤压强度的影响，发现将  $90^\circ$ 铺层放置下表面或者表面层的下方可以提高机械连接的挤压强度[4]。F. Taheri-Behrooz 研究[ $0^\circ/90^\circ$ ]s 铺层结构对针状螺栓连接承载载荷的影响，结果表明，表面为  $90^\circ$ 铺层的层合板的载荷要优于表面为  $0^\circ$ 的铺层[5]。国内黄学优等人通过试验研究了铺层对复合材料沉头螺栓连接承载能力的影响，并进一步分析了 4 种铺层结构的沉头螺栓连接层合板的失效行为[6]。在孔径对复合材料连接强度的影响研究方面，Buket 等研究了玻璃纤维方格布/环氧复合材料的销钉连接，认为开孔尺寸宽径比  $W/D \geq 3$ ，边径比  $\geq 2$  时，复合材料试样的连接强度最高[7]。Ranlkumar 和 Tossavainen 等对开孔尺寸对复合材料连接的影响做了研究，研究表明尺寸  $W/D$ ， $E/D$  等对试样破坏形式有影响，不同的  $W/D$  或  $E/D$  超过一定范围后，复合材料层压板的破坏模式会发生改变[8]。当前铺层比例对复合材料层压板连接挤压强度的研究还较少。

单钉双剪连接与单钉单剪连接是航空领域复合材料的两种最基本的连接形式。本文主要进行铺层比例、厚度和湿热环境对聚合物基复合材料层压板单钉双剪连接形式与单钉单剪连接形式的连接强度影响的试验研究，获得了铺层比例、厚度、湿热环境和连接形式对复合材料层压板连接强度的影响规律。

## 2. 试验件和方法

### 2.1. 试验件

按照 ASTM D5961 标准的要求，分别加工了孔径为 6 mm 的单钉双剪和单钉单剪两种连接形式的标准试验件，试验件具体尺寸 ASTM D5961 [9]。由于工艺考虑，飞机复合材料层压板通常只选择  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $\pm 45^\circ$  四种单向铺层方向，其最终铺层形式基本也均为这四种铺层方向的组合。另外一方面，由于考虑到飞机在实际使用中可能遇到的使用损伤问题，为了提高复合材料结构的损伤容限，飞机复合材料层压

板的铺层中必须包含较高比例的 $\pm 45^\circ$ 铺层(当 $\pm 45^\circ$ 铺层比例较低时, 复合材料层压板来自面外威胁的损伤阻抗通常很低)。基于以上考虑, 为了研究铺层比例对复合材料层压板挤压强度的影响, 共制备了表 1 所示的 7 种飞机复合材料结构常采用的典型铺层比例的试验件。每种铺层加工试验件 3 个批次, 每批次 6 件。试验件均为 T700 复合材料层压板。

**Table 1.** Ply ratio and thickness of test specimens  
**表 1.** 试验件的铺层比例和厚度

铺层代号	铺层比例 $[\pm 45/0/90]/\%$	层压板厚度/mm
I	(66/17/17)	3.60
II	(55/18/27)	3.20
III	(60/20/20)	3.00
IV	(58/21/21)	4.20
V	(56/22/22)	2.70
VI	(50/25/25)	3.60
VII	(53/20/27)	4.50

## 2.2. 试验方法

单钉双剪连接强度试验参照 ASTM D5961 标准的方法 A 执行, 单钉单剪连接强度试验参照 ASTM D5961 标准的方法 B 执行[9]。试验在 INSTRON 8801 型电液伺服材料试验机上进行。图 1 为单钉双剪和单钉单剪连接强度试验状态。试验时采用引伸计进行应变测量, 以 2 mm/min 的加载速度连续对试验件施加拉伸载荷, 直至载荷从最大值下降 30%, 记录最大载荷和破坏模式。



**Figure 1.** Photo: strength test state of single nail double shear and single nail single shear connection  
**图 1.** 单钉双剪和单钉单剪连接强度试验状态照片

试验结束后, 对每个试验件计算其连接挤压强度, 计算方法为试验件破坏前的最大载荷除以试验件的厚度和孔径。然后分别对单钉双剪和单钉单剪两种构型每一种铺层的 3 批次 18 件试验件的连接挤压强

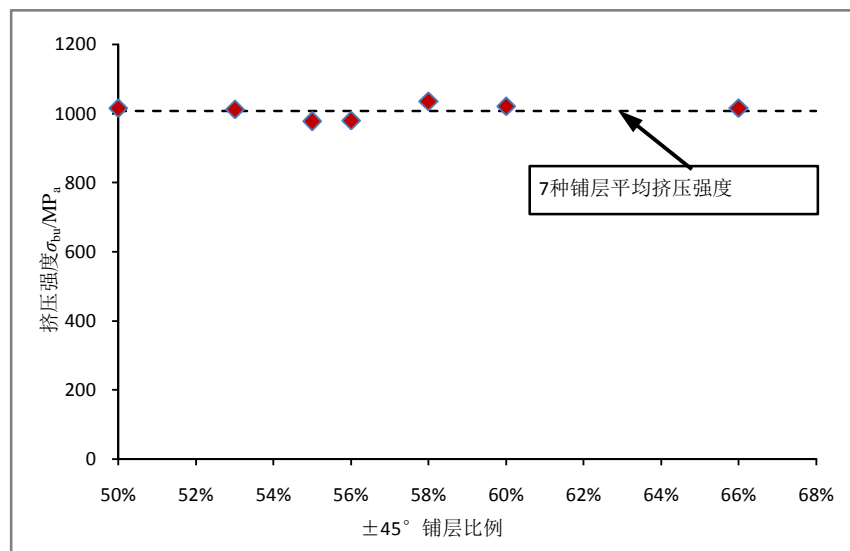
度取平均值，作为该铺层的平均连接挤压强度。

### 3. 铺层比例和厚度对单钉双剪连接强度的影响

表 2 给出了 7 种不同铺层比例和不同厚度试验件的单钉双剪连接挤压强度试验结果。其中每种铺层比例的挤压强度为 3 批次、每批次 6 件试验件的平均挤压强度。由该表可以看出， $\pm 45^\circ$  铺层在 50%~66% 范围内，改变  $0^\circ$  和  $90^\circ$  铺层的比例，7 种铺层与厚度复合材料层压板的单钉双剪连接挤压强度并未发生较大的变化，保持在全部 7 种铺层平均强度的  $\pm 3\%$  范围内。为了更加直观的表现这一结论，绘制图 2 所示的铺层比例与复合材料层压板单钉双剪连接挤压强度的曲线图。可见，当铺层比例在一定范围内改变时，适当改变  $\pm 45^\circ$ 、 $0^\circ$  和  $90^\circ$  的铺层比例和层压板的厚度并不会显著改变复合材料的层压板的挤压强度。需要特别说明的是，上面结论的前提条件是“铺层比例在一定范围内”。当复合材料层压板铺层比例超出一定范围后，如  $\pm 45^\circ$  铺层比例较小的时候，上面的结论并不能成立。但考虑到飞机复合材料结构由于损伤容限的需要，通常必须包含相当比例的  $\pm 45^\circ$  铺层，因此对于航空复合材料的常用典型铺层，上面的结论具有很好的适用性。

**Table 2.** Bearing strength of single nail double shear connection specimens with 7 ply ratios  
**表 2.** 七种铺层比例试验件的单钉双剪连接挤压强度

铺层代号	铺层比例 $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]/\%$	厚度/mm	强度 $\sigma_{bu}/\text{MPa}$
I	(66°/17°/17°)	3.60	1016
II	(55°/18°/27°)	3.20	977
III	(60°/20°/20°)	3.00	1021
IV	(58°/21°/21°)	4.20	1035
V	(56°/22°/22°)	2.70	979
VI	(50°/25°/25°)	3.60	1016
VII	(53°/20°/27°)	4.50	1012



**Figure 2.** Curve of ply ratio and bearing strength of composite laminates with single nail double shear connection

**图 2.** 铺层比例与复合材料层压板单钉双剪连接挤压强度的曲线图

#### 4. 铺层比例对单钉双剪连接强度的影响

表 1 中的 I 铺层和 VI 铺层具有相同的厚度(3.6 mm), 但铺层比例相差较大, 前者的 $\pm 45^\circ$ 、 $0^\circ$ 和  $90^\circ$ 铺层比例分别为 66%、17%和 17%, 后者为 50%、25%和 25%。表 3 给出了 I 铺层和 VI 铺层试验件的单钉单剪连接挤压强度, 两者几乎相同(相差 0.5%)。由表 3 可以看出, 当复合材料层压板厚度相同时, 改变层压板的铺层比例和铺层顺序, 并不会显著改变试验件的单钉单剪连接强度, 这表明影响复合材料层压板单钉单剪连接强度因素是层压板的厚度, 而非其铺层特性(包括铺层比例和铺层顺序)。需要特别说明的是, 该结论的前提条件同样是“铺层比例在一定范围内”, 当复合材料层压板铺层比例超出一定范围后, 如 $\pm 45^\circ$ 铺层比例较小的时候, 该结论是否成立还需要进一步的验证。但由于飞机复合材料结构的 $\pm 45^\circ$ 铺层比例通常不会太小, 对于飞机复合材料常用典型铺层, 上面的结论仍适用。

**Table 3.** Bearing strength of single nail single shear connection test specimens of ply I and ply VI  
**表 3.** I 铺层和 VI 铺层试验件的单钉单剪连接挤压强度

铺层代号	铺层比例 $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]/\%$	厚度/mm	强度 $\sigma_{bu}/\text{MPa}$
I	(66°/17°/17°)	3.6	623.7
VI	(50°/25°/25°)	3.6	626.9

#### 5. 厚度对单钉单剪连接强度的影响

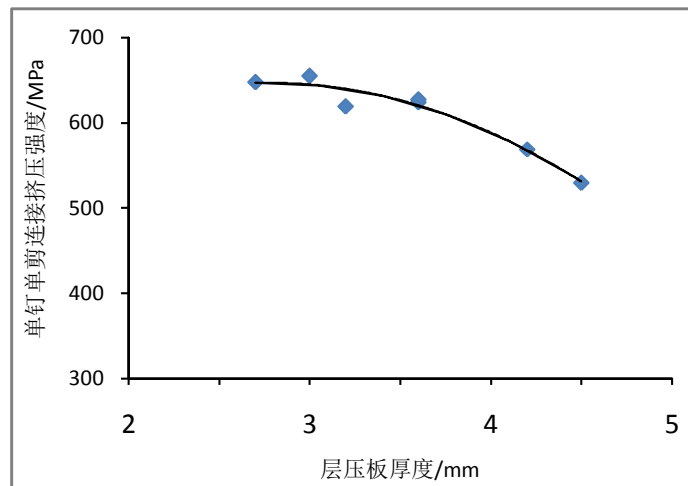
在第 3 节的研究中, 已经发现了影响复合材料层压板单钉单剪连接强度因素是层压板的厚度, 而非铺层。在该结论的基础上, 进一步研究厚度对单钉单剪连接强度的影响规律。表 4 给出了 7 种不同铺层比例和不同厚度试验件的单钉单剪连接挤压强度试验结果。对比表 2 和表 4, 可以发现单钉单剪连接挤压强度比单钉双剪连接挤压强度下降了 33%~47%。

**Table 4.** Bearing strength of single nail single shear connection specimens with 7 ply ratios and thickness

**表 4.** 七种铺层比例和厚度试验件的单钉单剪连接挤压强度

铺层代号	铺层比例 $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]/\%$	厚度/mm	强度 $\sigma_{bu}/\text{MPa}$
I	(66°/17°/17°)	3.60	623.7
II	(55°/18°/27°)	3.20	618.8
III	(60°/20°/20°)	3.00	654.7
IV	(58°/21°/21°)	4.20	568.8
V	(56°/22°/22°)	2.70	647.2
VI	(50°/25°/25°)	3.60	626.9
VII	(53°/20°/27°)	4.50	529.3

为了分析厚度对单钉单剪连接强度的影响, 根据表 4 数据绘制层压板厚度 - 单钉单剪连接挤压强度曲线, 见图 3。图 3 表明, 对于单钉单剪连接形式, 随着复合材料层压板厚度的增加, 单钉单剪连接挤压强度会逐渐降低。

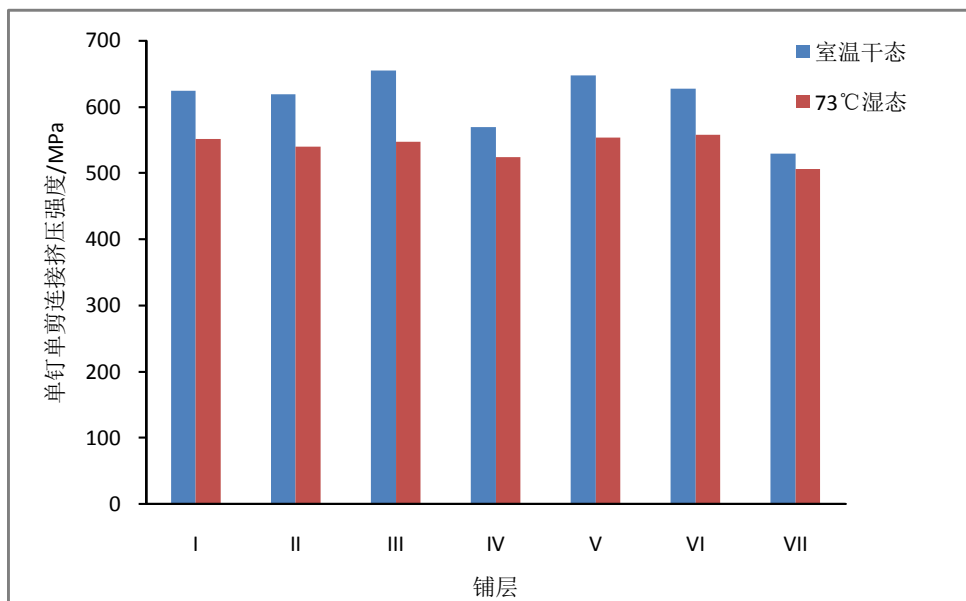


**Figure 3.** Curve of thickness and bearing strength of composite laminates with single nail single shear connection

**图 3.** 厚度与复合材料层压板单钉单剪连接挤压强度的曲线图

## 6. 湿热环境对单钉双剪和单钉单剪连接强度的影响

在 70°C、85% RH 环境条件下按照 ASTM D5229 对单钉双剪和单钉单剪试验件进行吸湿处理，直至达到吸湿平衡[10]。对吸湿平衡后的试验件在 73°C 环境条件下进行连接强度试验，研究湿热环境对单钉双剪和单钉单剪连接强度的影响。图 4 给出了试验所得的室温干态和高温湿热单钉双剪连接挤压强度的对比，图 5 给出了试验所得的室温干态和高温湿态单钉单剪连接挤压强度的对比。湿热环境下 7 种铺层复合材料层压板单钉双剪连接挤压强度比室温干态时下降了 7.2%~15.6%。湿热环境下 7 种铺层复合材料层压板单钉单剪连接挤压强度比室温干态时下降了 6.9%~12.8%。可见湿热环境均会引起两种连接形式挤压强度的降低。



**Figure 4.** Bar chart of bearing strength of single nail and double shear connection

**图 4.** 单钉双剪连接挤压强度柱状图



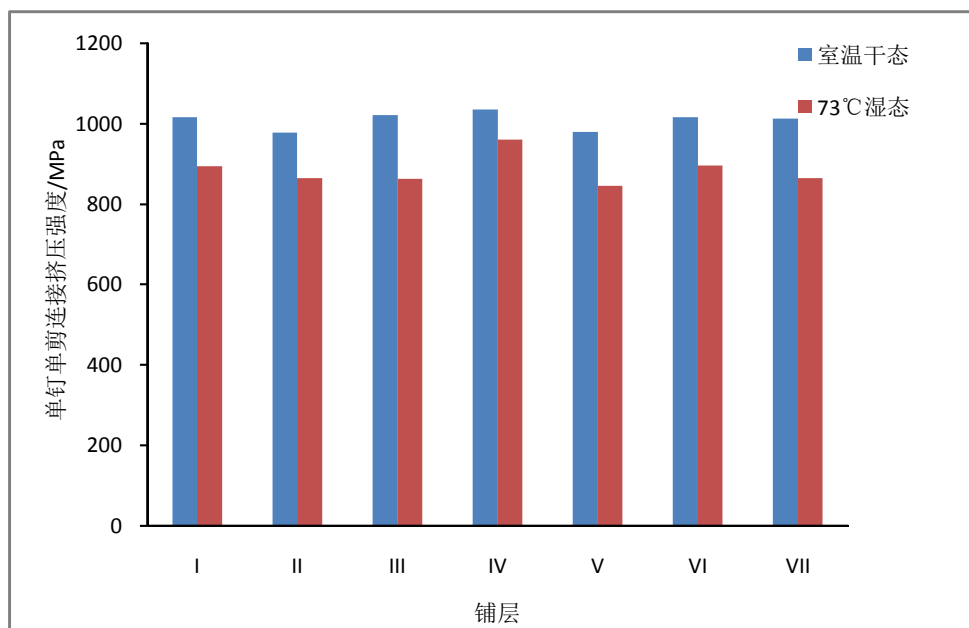


Figure 5. Bar chart of bearing strength of single nail and single shear connection  
图 5. 单钉单剪连接挤压强度柱状图

## 7. 研究结论

a) 对于只含有 $\pm 45^\circ$ 、 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 四种铺层的复合材料层压板,当铺层比例在一定范围内改变时,适当改变 $\pm 45^\circ$ 、 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 的铺层比例和层压板的总厚度,并不会显著改变复合材料层压板的单钉双剪连接挤压强度。

b) 对于只含有 $\pm 45^\circ$ 、 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 四种铺层的复合材料层压板,当铺层比例在一定范围内改变时,相同厚度的复合材料层压板,改变其铺层比例和铺层顺序,并不会显著改变复合材料层压板单钉单剪连接强度,这表明影响复合材料层压板单钉单剪连接强度因素是层压板的厚度,而非其铺层特性(包括铺层比例和铺层顺序)。

c) 对于单钉单剪连接形式,随着复合材料层压板厚度的增加,单钉单剪连接挤压强度会逐渐降低。

d) 湿热环境会引起单钉双剪连接和单钉单剪连接挤压强度较为明显的降低。

## 参考文献

- [1] CMH-17 Coordinating Committee (2002) Composite Material Handbook Volume 3. CMH-17 Coordinating Committee, 444-445.
- [2] Sun, H.-T., Chang, F.-K. and Qing, X. (2002) The Response of Composite Joints with Bolt-Clamping Loads, Part II: Model Development. *Journal of Composite Material*, **36**, 69-91. <https://doi.org/10.1177/0021998302036001302>
- [3] Sun, H.-T., Chang, F.-K. and Qing, X. (2002) The Response of Composite Joints with Bolt Clamping Loads, Part I: Model Development. *Journal of Composite Material*, **36**, 47-67. <https://doi.org/10.1177/0021998302036001301>
- [4] Subagia, I.D.G.A., Kim, Y., Tijing, L.D., et al. (2014) Effect of Stacking Sequence on the Flexural Properties of Hybrid Composites Reinforced with Carbon and Basalt Fibers. *Composites Part B: Engineering*, **58**, 251-258. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.027>
- [5] Taheri-Behrooz, F., Shokrieh, M.M. and Yahyapour, I. (2014) Effect of Stacking Sequence on Failure Mode of Fiber Metal Laminates under Low Velocity Impact. *Iranian Polymer Journal*, **23**, 147-152. <https://doi.org/10.1007/s13726-013-0210-y>
- [6] 黄学优, 张彦飞, 杜瑞奎, 等. 铺层结构对 EP/GF 复合材料沉头螺栓连接失效的影响[J]. 工程塑料应用, 2016,

44(3): 65-69.

- [7] Okutan, B., Zuleyha, A. and Karakllzu, R. (2001) A Study of the Effects of Various Geometric Parameters on the Failure Strength of Pin-Loaded Woven-Glass-Fiber Reinforced Epoxy Laminate. *Composites Science and Technology*, **61**, 1491-1497. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00043-4)
- [8] Ramkumar, R.L. and Tossavainen, E.W. (1986) Strength and Life Time of Bolted Laminates. In: Potter, J.M., Ed., *Fatigue in Mechanically Fastened Composite and Metallic Joints*, ASTMSTP 927, Philadelphia, PA, 251-273. <https://doi.org/10.1520/STP29063S>
- [9] ASTM Committee D30 on Composite Materials (2017) Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates: ASTM D5961-2017. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [10] ASTM Committee D30 on Composite Materials (2014) Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials: ASTM D5229-2014. ASTM International, West Conshohocken, PA.