复合材料学报 第22卷 第6期 12月 2005年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 22 No. 6 December 2005

文章编号: 1000-3851 (2005) 06-0135-04

厚度对缝纫层合板力学性能的影响

陈 纲, 郦正能*, 程小全, 寇长河
(北京航空航天大学 航空工程与科学学院, 北京 100083)

摘 要: 比较了缝纫、无缝纫层合板力学性能差异, 同时考虑了缝纫引起的厚度变化。通过拉伸、压缩试验研究了缝纫对层合板及含孔板的拉伸、压缩强度和破坏机理的影响。研究结果表明, 缝纫带来的厚度变化影响了面内纤维体积含量, 这对评定缝纫层合板力学性能至关重要。

关键词: 缝纫层合板; 厚度; 破坏机理
中图分类号: TB330.1 **文献标识码**: A

EFFECT OF THICKNESS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE STITCHED LAMINATES

CHEN Gang, LI Zhengneng*, CHENG Xiaoquan, KOU Changhe
(School of Aeronautics Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The mechanical properties of the stitched laminates were compared with those of the unstitched laminates, considering changes in thickness due to stitching. Experimental investigation was conducted to understand the effect of stitching on tensile strength, compression strength, open-hole tensile strength, open-hole compression strength and failure mechanisms. The results show that the change in thickness due to stitching affects the volume fractions of in-plane fibers, which is important to assessing the mechanical properties of the stitched laminates.

Keywords: stitched laminates; thickness; failure mechanisms

缝纫能明显提高复合材料层合结构的层间性能, 使其具有良好抗冲击和冲击后压缩性能[1~4], 但同时也带来了一些负面影响, 如: 铺层纤维的面内弯曲, 缝纫过程造成的铺层纤维的断裂, 以及层合板厚度的增加和纤维体积分数的改变等。

国内外学者对缝纫层合结构的面内性能进行了大量的试验研究, 但众多的研究结果并没有成为缝纫复合材料应用于高性能结构中的有力支持。他们对缝纫层合结构面内性能的研究结果存在明显的不一致性[5~12]。有的学者认为缝纫提高了层合板的面内力学性能, 部分学者认为缝纫降低了层合板面内性能, 而另一些人认为缝纫对层合板面内性能没有明显的影响。大多研究者在强调数据结果的同时, 缺少对损伤机理的观察与分析。更值得注意的是, 人们在评定缝纫层合板性能优劣的过程中, 通常以同类的无缝纫层合板作为评判标准。但是有、无缝纫层合板在纤维、基体的构成组份上通常存在差异, 差异的大小直接影响到评判的结果, 较大的差异会使比较结果失去意义。因此, 在研究缝纫对层合板力学性能影响的同时, 应首先考虑有、无缝纫层合板力学性能的可比性。通常情况下, 在缝纫过程中被缝纫的铺层纤维的横截面面积始终固定, 因此缝纫层合板与无缝纫层合板的厚度差异能够直接反映纤维含量。例如: 不考虑层合板内部存在空隙, 假设将缝线所占体积作为缝纫后整个层合板的体积增加量, 采用改进的锁扣缝纫(图 1), 缝线为 Kevlar49, 面线 1400 旦尼尔(Denier), 底线 400 旦尼尔, 缝纫针距 ×行距为 5 mm ×5 mm, 无缝纫层合板厚度为 2 mm, 则当缝纫后层合板的厚度与无缝纫层合板的厚度比值为 102.22 %时, 可认为缝纫层合板的面内纤维含量与无缝纫层合板相当。当然, 实际情况下缝纫层合板的厚度不可能控制得十分精确, 而正常情况下, 其增减幅度不宜过大, 但在现有的研

收稿日期: 2004-11-23; 收修改稿日期: 2005-03-15
基金项目: 航空基础科学基金(05B51044); 凡舟基金(20030503)
通讯作者: 郦正能, 教授, 主要从事飞机结构设计、复合材料力学性能等方面的研究 E-mail: xchengang@sina.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

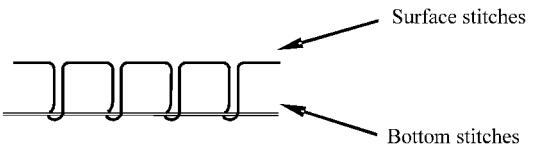


图 1　改进的锁扣缝纫

Fig. 1　Modified lock stitches

究报告中很少有关于这方面数据的详细描述。

本文作者对缝纫层合板以及含孔板的拉伸、压缩性能进行了试验研究，分析了有、无缝纫层合板的厚度比与强度比的关系，并对破坏机理进行了对比分析。

1　试验及结果分析

试验采用的试件材料为 T300 帘子布/ Q Y9512，制造工艺为 RFI，缝线为 Kevlar 49，面线 1400 Denier，底线 400 Denier，缝纫针距 ×行距为 5 mm ×5 mm。试件的测试状态为自然，环境温度为 25 ℃。

1.1　缝纫层合板拉伸性能

缝纫层合板的拉伸强度低于同类无缝纫层合板(图 2(a))。当缝纫层合板厚度增幅在 10 %以内时，缝纫层合板拉伸强度约为同类无缝纫层合板的 90 %；随着缝纫厚度的增加，层合板的拉伸强度急剧下降，当有、无缝纫层合板的厚度比达到 120 %时，缝纫层合板的拉伸强度降为同类无缝纫层合板的 65 %左右。无缝纫层合板断口边缘明显分层，而缝纫层合板沿板宽方向在针脚附近断裂(见图 2(b))，断口边缘非常整齐，无边缘分层现象，这与针脚附近的应力集中有关。

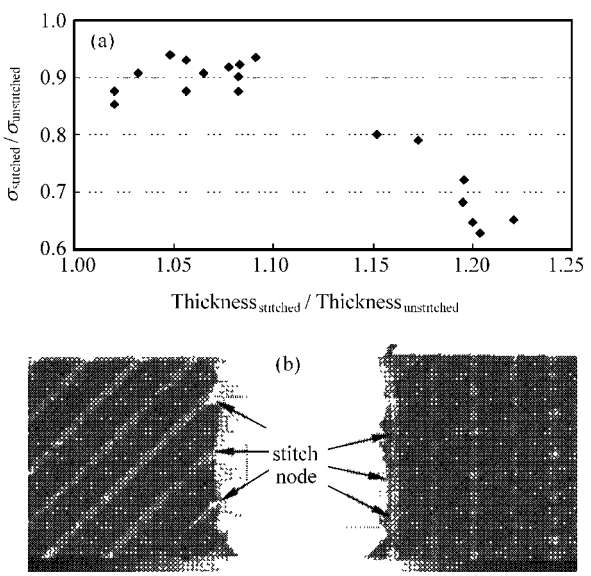


图 2　缝纫对层合板拉伸强度的影响及其破坏模式

Fig. 2　Effect of stitching on tensile strength (a) and the failure mode (b)

1.2　缝纫层合板压缩性能

图 3(a)中的数据表明，缝纫、无缝纫层合板的压缩强度的优劣完全取决于缝纫后层合板厚度的增加幅度。缝纫层合板厚度增加幅度在 10 %以内，缝纫、无缝纫层合板的压缩强度基本相当，随着缝纫厚度的增加，层合板压缩强度降低。从图 3(a)还可以看出，当缝纫层合板厚度低于同类无缝纫层合板时，其压缩强度提高约 10 %。对于无缝纫层合板，其压缩破坏形式以层间分层损伤为主，分层破坏区域较大，试件表面铺层向外侧突起断裂；而在缝纫层合板中，分层扩展得到有效地抑制，但是由于缝纫造成了纤维弯曲，使弯曲纤维在压缩载荷作用下易于折皱断裂，特别是在层合板表面纤维弯曲严重的位置更易产生这种折皱式断裂。由于空间的限制，断裂纤维在压缩载荷作用下累积，并折向层合板表面，最终形成斜型断口，如图 3(b)。缝纫层合板的压缩破坏区域比较集中，断口基本上是一条直线并垂直于载荷作用方向。

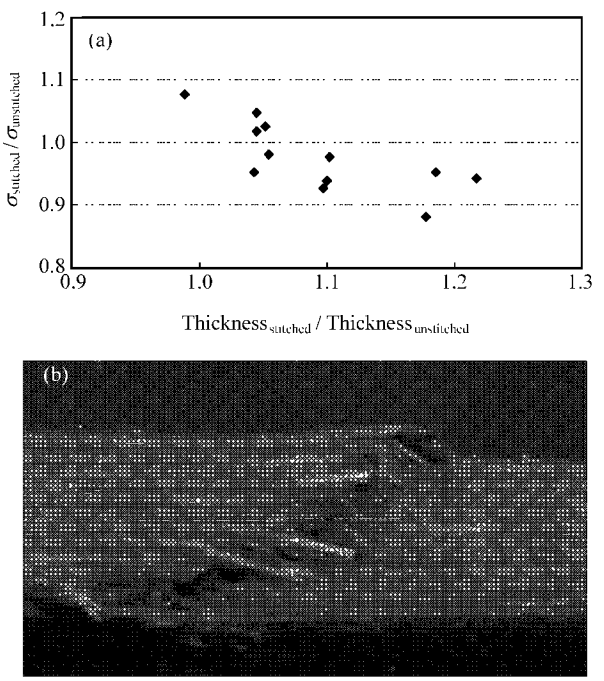


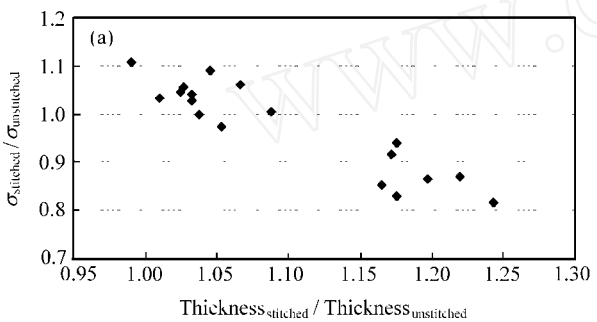
图 3　缝纫对层合板压缩强度的影响及其破坏模式

Fig. 3　Effect of stitching on compression strength (a) and the failure mode (b)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.3　缝纫含孔板的拉伸性能

开孔拉伸试验结果表明, 缝纫层合板厚度增幅在 10 %以内, 缝纫含孔板的拉伸强度与无缝纫孔板相当, 甚至略有提高。随着缝纫厚度的增加, 开孔强度明显下降, 厚度增幅在 20 %时, 缝纫孔板的拉伸强度降为同类无缝纫含孔板的 85 %左右。而当缝纫孔板厚度小于同类无缝纫含孔板时, 其开孔拉伸强度较无缝纫孔板提高约 10 %。无缝纫含孔板拉伸破坏断口的边缘存在明显的分层损伤, 而缝纫含孔板的断口边缘比较整齐, 无明显分层。缝纫含孔板的断裂痕迹与孔边的针脚排列有很大关系(图 4(b)), 当针脚沿板宽方向平行分布于孔中心线两侧时, 断裂痕迹位于两排针脚之间; 当针脚沿板宽方向分布于孔中心线附近时, 断口沿宽度方向分布于针脚附近。



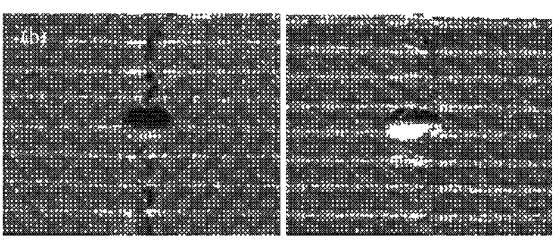
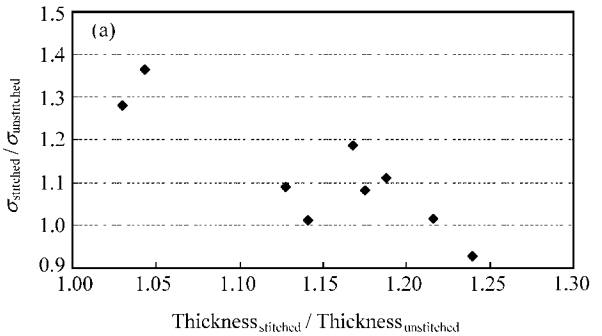


图 4　缝纫对孔板拉伸强度的影响及其破坏模式

Fig. 4　Effect of stitching on open-hole tensile strength (a) and the failure mode (b)

1.4　缝纫含孔板的压缩性能

缝纫有利于含孔板的压缩性能。缝纫孔板的厚度增幅小于 10 %的情况下, 其压缩强度高出同类无缝纫孔板 30 %, 随着厚度增幅的增大, 缝纫孔板的压缩强度逐渐下降, 见图 5(a)。无缝纫含孔板在压缩载荷作用下主要是层间分层屈曲破坏, 分层破坏区域较大(图 5(b))。缝纫含孔板的破坏模式与缝纫层合板相同, 均以铺层纤维折皱断裂为主。在孔板压缩过程中折皱断裂首先出现于孔边的应力集中区域, 随着压缩载荷的增加, 损伤沿针脚



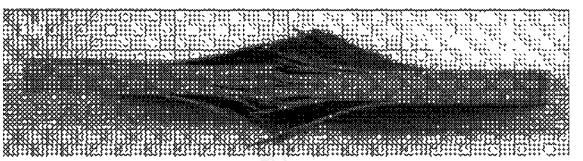


图 5　缝纫对孔板压缩强度的影响及无缝纫孔板的破坏模式

Fig. 5　Effect of stitching on open-hole compression strength (a) and the failure mode of unstitched plate with open-hole (b)

位置逐步向板的边缘扩展, 并且出现折皱断裂的部分仍能承受一定的载荷。缝纫层合板在压缩载荷下的折皱断裂破坏过程相对不稳定, 初始折皱损伤一旦出现, 层合板就会突然压缩断裂。

需要指出的是, 本文中主要研究厚度增幅对缝纫层合板力学性能的影响, 试验结果表明, 试件铺层顺序和缝纫方向的改变并未对试验结果产生明显影响。

2　分析与讨论

缝纫对层合板结构的影响主要包括: 铺层纤维体积含量的变化、面内纤维的准直性和铺层纤维的断裂 。而对于干法缝纫, 缝纫造成的铺层纤维损伤较小, Herszberg 等人的研究也表明, 由缝纫造成的铺层纤维断裂对层合板面内性能的影响非常微弱。这主要是因为在典型的层合复合材料结构中, 载荷由断裂纤维传递到周围 0.1 mm 左右内的无损伤纤维上, 只有当断裂纤维的平均间距低于0.5 mm 时才能造成面内性能的明显下降。实际上, 缝纫复合材料中断裂纤维的间距通常在 3～10 mm 之间, 断裂纤维的体积含量也不超过 0.5 %[13]。因此, 铺层纤维体积含量的变化和面内纤维的准直性是影响缝纫层合板面内性能的主要因素。

仅从纤维体积含量的角度考虑, 采用等强度分析方法, 材料沿纤维方向的拉伸强度可表示为

$$\sigma_{T,max} = \sigma_{f,max}\left[V_f + \frac{E_m}{E_f}(1 - V_f)\right] \qquad (1)$$

式中 $\sigma_{,max}$ 为最大纤维拉伸应力。通常情况下 $E_m \ll$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

E_f，因此，式(1)可写为

$$\sigma_{T,max} \approx \sigma_{f,max} V_f \tag{2}$$

令有、无缝纫层合板的厚度比为 h，无缝纫层合板的纤维体积含量为 V_f，则缝纫后材料沿纤维方向的拉伸强度为

$$\sigma_{T,max(stitch)} = \sigma_{T,max(unstitch)} / h \tag{3}$$

若采用压缩屈曲模型，则沿纤维方向的压缩强度为

$$\sigma_C = 2V_f \sqrt{\frac{E_m E_f V_f}{3(1 - V_f)}} \tag{4}$$

缝纫后材料沿纤维方向的压缩强度为

$$\sigma_{C(stitch)} = \sigma_{C(unstitch)} \frac{1}{h} \sqrt{\frac{1 - V_f}{h - V_f}} \tag{5}$$

以无缝纫层合板纤维体积分数 60 %为例，缝纫厚度增幅与纤维方向的拉、压强度关系如图 6 所示。可以看出，不考虑缝纫造成的纤维弯曲，仅从缝纫厚度变化角度出发，缝纫厚度增幅对材料纤维方向上的拉压强度，特别是压缩强度的影响较大。缝纫层合板的拉、压破坏模式均以纤维断裂为主。因此，从有、无缝纫层合板强度可比性角度出发，在比较两者强度时应首先考虑纤维体积分数的差异，通常情况下缝纫后层合板厚度增幅不宜太大，现有的工艺水平下，缝纫层合板厚度增幅为 5 %较为理想。

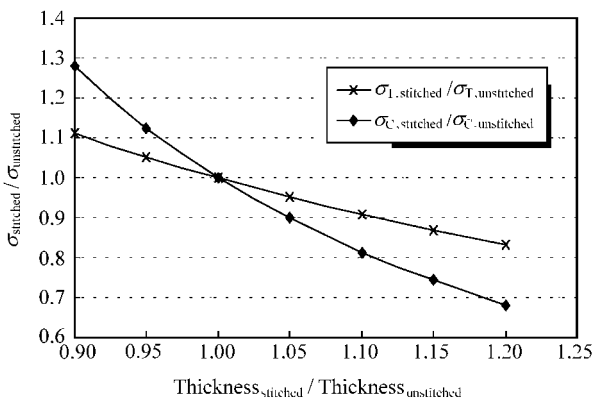


图 6　厚度增幅与铺层轴向强度的关系

Fig. 6　Relationship between h and on-axis strength of a laminate

3　结　论

缝纫层合板在拉、压载荷作用下均以纤维断裂破坏为主。通常情况下，厚度的差异反映出有、无缝纫层合板纤维体积分数的不同。因此，有、无缝纫层合板厚度的差异对衡量其力学性能起着至关重要的作用，合理的厚度增幅是保证有、无缝纫层合板力学性能可比性的前提。目前，国内缝纫复合材料的工艺水平比较成熟，能够较好地控制缝纫后层合板的厚度增幅，这对缝纫复合材料结构的研究与应用提供了良好的生产条件。

参考文献：

[1]　桂良进，程小全，寇长河，等. 缝纫对复合材料层合板强度和抗冲击性能的影响 [J]. 航空学报，2000，21(4)：368 - 371.
Gui L J, Cheng X Q, Kou C H, *et al*. Effect of stitching on strength and impact damage resistance of composites laminates [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2000, 21(4): 368 - 371.

[2]　Sharma S K, Sankar B V. Sublaminate buckling and compression strength of stitched uniweave graphite/epoxy laminates [J]. *J of Reinforced Plastics and Composites*, 1997, 16(5): 425 - 434.

[3]　陈　纲，桂良进，郦正能，等. 缝纫层合板低速冲击损伤有限元分析 [J]. 航空学报，2002，23(1)：55 - 58.
Chen G, Gui L J, Li Z N, *et al*. Finite element analysis of low-velocity impact damage of stitched laminates [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2002, 23(1): 55 - 58.

[4]　程小全，郦正能，寇长河. 低速冲击后复合材料层合板的压缩破坏行为 [J]. 复合材料学报，2001，18(1)：115 - 119.
Cheng X Q, Li Z N, Kou C H. Compressive failure behavior of composite laminates after low velocity impact [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2001, 18(1): 115 - 119.

[5]　Wu E, Wang J. Behavior of stitched laminates under inplane tensile and transverse impact loading [J]. *Journal of Composite Materials*, 1995, 29(17): 2254 - 2279.

[6]　Mouritz A P, Cox B N. A mechanistic approach to the properties of stitched laminates [J]. *Composites Part A*, 2000, 31: 1 - 27.

[7]　Mouritz A P, Leong K H, Herszberg I. A review of the effect of stitched on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites [J]. *Composites Part A*, 1997, 28A: 979 - 991.

[8]　Kang T J, Lee S H. Effect of stitching on the mechanical and impact properties of woven laminate composite [J]. *J of Composites Materials*, 1994, 28(16): 1574 - 1587.

[9]　Reeder J R. Stitching *vs* a toughened matrix: Compression strength effects [J]. *J Comp Mater*, 1995, 29: 2464 - 2487.

[10]　Furrow K W, Loos A C, Cano R J. Environmental effects on stitched RTM textile composites [J]. *J Rein Plast Comp*, 1996, 15: 378 - 419.

[11]　Vimala S, Gangarao H V S. Composites with 3-D stitched fabrics [J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2003, 19(1-2): 188 - 199.

[12]　Larsson F. Damage tolerance of a stitched carbon/epoxy laminate [J]. *Composites Part A*, 1997, 28: 923 - 934.

[13]　陈　纲，郦正能，寇长河. T300 帘子布/QY9512 缝纫含孔板拉伸性能 [J]. 复合材料学报，2005，22(4)：108 - 111.
Chen Gang, Li Zhengneng, Kou Changhe. Behavior of stitched uniweave T300/QY9512 laminates (with a hole) under in-plane tension [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2005, 22(4): 108 - 111.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net