

三维机织复合材料/钛合金混杂板 缝合连接剪切失效机理

Failure mechanism of stitched three dimension
woven composite/Ti alloy hybrid board
joint under shear load

卢轶榕¹, 郑华勇^{2,3}, 陈秀华¹, 汪 海¹

(1 上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240; 2 上海宇航系统工程研究所,
上海 201109; 3 上海市空间飞行器机构重点实验室, 上海 201108)

LU Yi-rong¹, ZHENG Hua-yong^{2,3}, CHEN Xiu-hua¹, WANG Hai¹

(1 School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong

University, Shanghai 200240, China; 2 Aerospace System

Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China;

3 Shanghai Key Laboratory of Spacecraft

Mechanism, Shanghai 201108, China)

摘要: 为研究缝合密度、缝线纤维束规格以及钛合金板上预制的缝合孔直径对经过缝合的三维机织复合材料/钛合金混杂板缝合连接结构抗剪切能力的影响,对 7 组缝合参数各不相同的单搭接实验件进行剪切实验。通过加载条件下的原位细观实验观察,获得不同缝合参数下接头的失效模式,给出对应载荷-位移曲线上特征点的损伤形貌。结果表明:增加碳纤维缝线的丝束规格以及增加缝合密度均能提高混杂接头的失效载荷,且增加缝合密度比增加碳纤维缝线的丝束规格对提高失效载荷的效果更明显;缝合孔直径为 2 mm 或 4 mm 对结构承载能力无明显影响,当缝合孔直径达到 6 mm 时,承载能力明显降低;通过细观原位力学实验观察了三维机织复合材料/钛合金混杂板缝合结构剪切破坏过程;实验结果表明,搭接区的失效模式有缝线纯剪断、缝线抽出与剪断混合以及缝线挤出/剪断混合 3 种。缝合密度的变化是接头失效模式改变的主要因素。

关键词: 三维机织/钛合金混杂;缝合单搭接连接;剪切性能;原位实验;失效机理

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.001093

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)11-0162-08

Abstract: In order to study the effect of stitching density, tow size of the suture and diameter of the stitching hole on the shear property of the stitched three-dimensional woven composite/titanium hybrid board stitching connection structure, seven groups of samples with different stitching densities, tow size of the suture and diameter of the stitching hole were tested. A reference group whose samples were unstitched was also tested to show the effect of stitching on the joint. Different failure modes of the lap zone with different stitching parameters were observed in *in-situ* meso-experiment, and the damage morphologies of the characteristic points on the load-displacement curve were given. The result shows that increasing tow size of the suture and increasing stitching density can both increase the failure load of the hybrid joint. Increasing the stitching density is proved more effective in improving the failure load. Doubling the stitching density can increase the failure load of the stitched joint about 82.0%. Doubling the tow size of the suture can only increase the failure load of the joint about 24.3%; Whether the diameter of the stitching hole is 2 mm or 4 mm do not influence the bearing capacity of the structure obviously, and when the stitching hole diameter reaches 6 mm, the bearing capacity is reduced due to the low strength of the epoxy resin in the gap between stitching hole and suture. It is dangerous to increase diameter of stitching hole above 4 mm; the shear failure of the stitched three-dimension woven composite/titanium alloy hybrid structure is observed by

mesoscopic mechanical test. Composite/titanium alloy interface failure, crack initiation and extension in composite or in lap zone and failure of the lap zone are the three main stages of the structure failure observed in the test; The suture failure in the connect zone includes suture pull out and suture cut off. There are three failure modes of the lap zone observed in test. In suture cut off mode, all sutures in lap zone are cut off. The position at which the suture is cut is related to the diameter of the stitching hole. In suture cut off/pull out mixed mode, some of the interface between suture and three-dimension woven composites fail and the suture is partly or completely pull out. In the group with high stitching density, sutures near the end of the three-dimension woven composite crush the composite and extrude out of the composite. Stitching density is the major factor in the failure mode of the joint.

Key words: three-dimension woven composite/Ti alloy hybrid; stitching single-lap connect; shear property; *in-situ* test; failure mechanism

与传统的纤维增强复合材料(FRP)相比,三维机织复合材料(3DWC)通过引入 z 方向上的增强纤维来解决传统 FRP 层间剪切强度的不足,提高了材料的抗分层能力与抗冲击性能。在特定的结构中,为了提高结构抗冲击性能,还需要在复合材料外粘覆一层金属来提高其面外抗冲击性能。树脂基复合材料与金属材料之间的界面问题是长期困扰工程界的一大难题,长期以来,为解决此界面问题,提出了很多方法,例如改进胶接接头性能^[1-3]、使用铆钉、螺栓等机械连接技术^[4-7]、使用 Z-pin 增强接头^[8-9]等。Z 向缝合技术是一种常用的加强 FRP 厚度方向上力学性能的技术。通常用缝针在预制件中缝入缝线,再对预制件采用树脂传递模塑成型(RTM)或树脂膜渗透(RFI)工艺进行整体成型。这种方法被证明能较大幅度地提升复合材料的抗分层能力以及抗冲击损伤能力。

目前对通过缝合技术提升复合材料接头性能已有较多的研究, Bigaud 等^[10]研究了单边缝合对 T 型接头抗拉脱强度的影响,发现缝合加强可以显著提升 T 型接头的抗拉脱能力。李梦佳等^[11]研究了缝合参数对层合复合材料 T 型接头拉脱承载能力的影响,并得出了缝线强度越高、模量越小则补强后接头的拉脱强度越高的结论;在缝合对复合材料接头的强化作用方面,焦亚男等^[12-13]研究了缝合连接三维编织复合材料的接头性能和破坏模式,发现断口主要有端部整体断裂、缝合区内缝线剪断以及两者兼有的混合断裂。Jain 等^[14]研究了锯齿形 Kevlar 复合材料层合板单搭接缝合接头中缝合参数对厚度方向失效模式的影响。Ghasemnejad 等^[15]通过实验比较了缝合和胶接单搭接接头在冲击载荷下的性能,发现缝合能提高接头的抗冲击能力。Mouritz 等^[16]综合了大量前人的研究数据,认为缝合工艺对板产生的影响,比如缝合时层合板纤维的压弯情况、复合材料板中纤维受缝合工艺影响

导致的弯折等才是影响缝合层合板的力学性能的主要原因。An 等^[17]比较了两端缝合对 RTM 成型复合材料接头强度的影响,发现缝合能显著提高复合材料接头的强度。

通过缝合技术增强接头性能的研究主要集中在其对纯复合材料接头的强化作用上,对于缝合技术增强复合材料/金属混杂连接结构的研究较少。本工作对搭接区参数不同的缝合接头的剪切性能进行实验研究,结合对不同载荷水平下的接头进行原位细观观察得到的结果,对三维机织复合材料/钛合金混杂板的缝合连接接头失效机制进行了描述,得到缝合密度,缝线纤维束规格以及缝合孔直径对接头失效载荷的影响规律,为该类连接形式在工程中的设计和应用提供可靠依据。

1 实验材料与方法

1.1 实验件材料与实验件构型

本研究中所使用的实验件为由 TC4 钛合金板与 3DWC 板通过 RTM 工艺制作成的缝合搭接件。实验件中的 3DWC 预制体由碳纤维束机织而成,如图 1 所示,碳纤维束截面近似椭圆形。基体采用环氧树脂,复合材料中的纤维体积分数为 53%。本工作中所有实验件的拉伸方向均为经纱方向。

实验件接头搭接区域如图 2 所示,从左至右分别为 3DWC 层 I、Ti 层 I、3DWC 层 II、Ti 层 II。中央的 Ti 层 I 上预制有缝合孔以便缝线穿过,3DWC 层的厚度均为 5 mm,1~4 组及对照组的钛合金板厚 $t=1$ mm,5~7 组的钛合金板厚 $t=2$ mm。实验件总厚度分别为 12 mm(1~4 组及对照组)、14 mm(5~7 组)。实验件的制备工艺为将预制体与钛合金板在搭接区缝合后使用 RTM 工艺成型。3DWC 层与 Ti 层

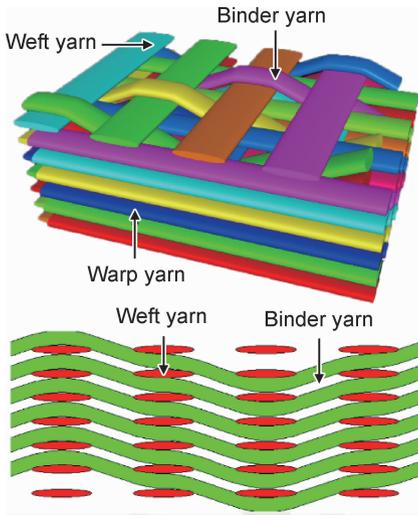


图1 三维机织复合材料单元结构

Fig. 1 Unit cell structure of 3D woven composites

之间没有胶膜,直接通过 RTM 工艺树脂固化连接。在搭接区,3DWC 层 I、Ti 层 I、3DWC 层 II 之间通过缝合连接,除搭接区部分以外均未进行缝合处理。为了研究缝合密度、纤维束规格以及钛板上的缝合孔直径对接头剪切性能的影响,规划了 7 组缝合实验件,另有 1 组搭接区未缝合处理的实验件作为基准对照。表 1 列出了每组实验件搭接区的各项参数。其中

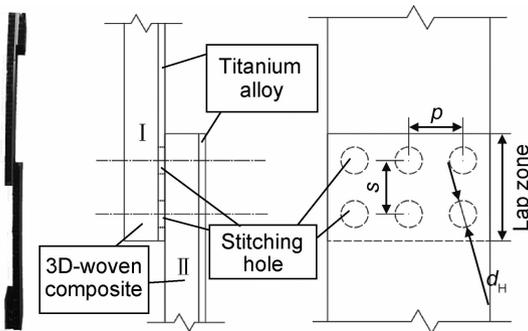


图2 实验件外观与搭接区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the sample and lap zone

表 1 3DWC/钛合金混杂板搭接实验件搭接区参数

Table 1 Lap zone parameter of samples

Group No	Tow size of suture	Stitching density/(mm×mm)	d_H /mm	t /mm	Number of samples
1	24 k	4×8	2	1	4
2	48 k	4×8	2	1	4
3	48 k	6×8	2	1	4
4	48 k	8×8	2	1	4
5	48 k	8×8	2	2	4
6	48 k	8×8	4	2	4
7	48 k	8×8	6	2	4
8	None	None	None	1	3

缝合密度(stitching density)以缝合孔之间的间距(s)×排距(p)表示。

1.2 静力拉伸实验

在实验过程中,为了观察实验过程中缝线的变化与搭接区失效的细观形式,采用了连接有工业相机的光学显微镜对实验件进行观察,可记录在实验过程中搭接区失效前出现的细观裂缝等破坏预兆以及破坏形式。实验装置如图 3 所示,实验载荷与上横梁的位移由 UTM5105X 微机控制电子万能力学试验机实时记录。为了更好地观察实验件中的裂纹萌生及扩展及失效模式,实验采用了 0.5 mm/min 的位移控制加载速率。

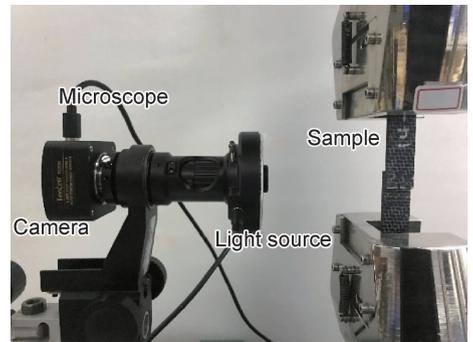


图3 实验装置与实验过程中使用的细观观测设备

Fig. 3 Experimental setup and mesoscopic observation device

2 结果与分析

表 2 列出了各实验件的失效载荷、各组的失效载荷的平均值以及标准差。为了更好地体现缝合技术对搭接区失效载荷的提升作用,对失效载荷做了无量纲化处理,表 2 所列结果均为实验得到的失效载荷与对照组平均失效载荷的比值。图 4 显示了各组平均失效载荷之间的对比。结果表明,对 3DWC/钛合金混杂板接头进行缝合加强能够显著提高接头的失效载荷,缝合后的接头失效载荷普遍提升了 50% 以上,最明显的第 6 组接头失效载荷平均提升了 288%。

2.1 缝合参数对接头失效载荷的影响

使用 48 k 纤维束代替 24 k 纤维束作为缝线可以提升缝线的剪切强度,缝线与 3DWC 之间的接触面积也会因为缝线的直径增加而略有增加。图 5 显示了在实验中得到的两组典型载荷-位移曲线。第 1 组和第 2 组的平均失效载荷与对照组的比值分别为 2.30 和 2.86,使用 48 k 纤维作为缝线能使实验件的失效载荷提升 24.3%。

表 2 失效载荷相对于基准值的标准化结果

Table 2 Nondimensionalized failure load of samples in the test

Group	Nondimensionalized failure load				Average	Variance
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4		
1	2.16	2.33	2.36	2.36	2.30	6.92×10^{-3}
2	2.98	2.83	2.83	2.79	2.86	5.27×10^{-3}
3	2.09	2.29	2.06	2.40	2.21	1.99×10^{-2}
4	1.68	1.47	1.62	1.51	1.57	7.05×10^{-3}
5	3.45	4.07	3.94	3.90	3.84	5.47×10^{-2}
6	4.10	3.71	3.95	3.77	3.88	2.36×10^{-2}
7	3.08	2.67	2.78	2.82	2.84	2.26×10^{-2}
8	0.89	1.04	1.08		1.00	6.69×10^{-3}

Notes: nondimensionalized failure load is the ratio of the failure load to the average failure load of group 8(reference group).

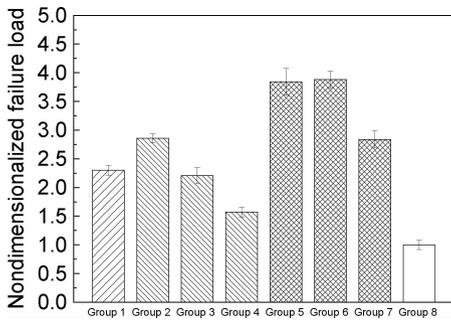


图 4 各组实验件的失效载荷对比

Fig. 4 Failure load of the samples

增加缝合密度可以使缝线与 3DWC 之间的接触面积增加,此外也能降低单根缝线所受到的剪切应力。从实验结果中可以看出,随着缝合密度的逐步增加,接头的失效载荷发生了较为显著的提高。第 2 组(4 mm×8 mm)与第 3 组(6 mm×8 mm)的实验件的平均失效载荷与对照组的比值分别为 2.86 与 2.21,比第 4 组(8 mm×8 mm)中实验件的比值 1.57 分别高出了 82.0%与 40.5%。图 6 显示了在实验中得到的 3 条典型载荷-位移曲线以及无缝合的第 8 组中的一条典型载荷-位移曲线。

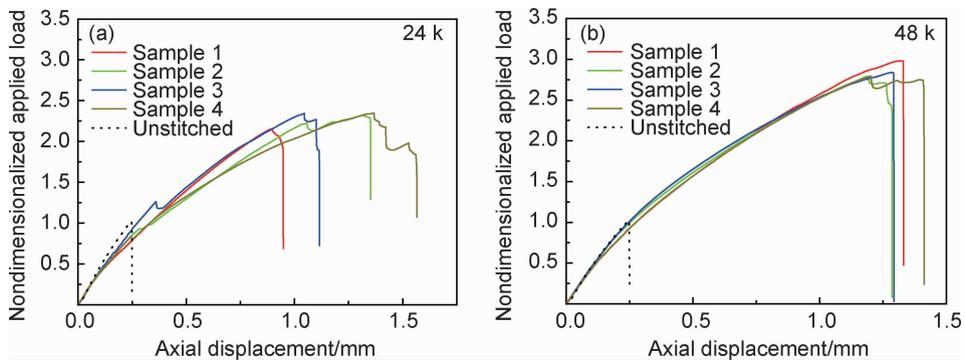


图 5 第 1 组(a)与第 2 组(b)的载荷-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of group 1(a) and group 2(b)

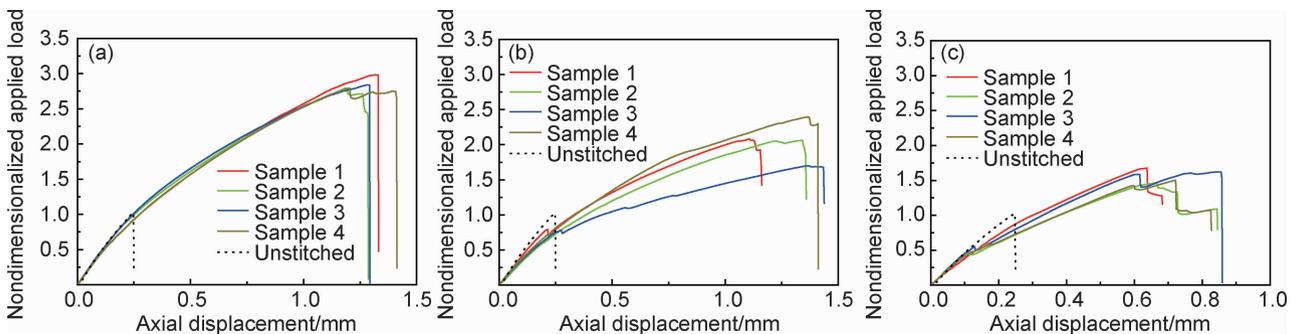


图 6 不同缝合密度的载荷-位移曲线 (a)第 2 组;(b)第 3 组;(c)第 4 组

Fig. 6 Load-displacement curves with different stitching densities (a)group 2;(b)group 3;(c)group 4

缝合孔直径扩大会导致缝线与钛合金板之间的间隙增大,其中会填充进更多的基体材料,使得连接部分的整体刚度下降。图7显示了在实验中得到的3条典型载荷-位移曲线,可以看到,缝合孔直径越大实验件的刚度越低。缝合孔中存在一些基体材料对接头失效

载荷的影响不明显,第5组($d_H=2\text{ mm}$)的平均失效载荷与对照组的比值为3.84,与第6组($d_H=4\text{ mm}$)的比值3.88相当。缝合孔中存在过多的基体材料则会使得接头的失效载荷下降。第7组($d_H=6\text{ mm}$)的平均失效载荷仅为2.84。

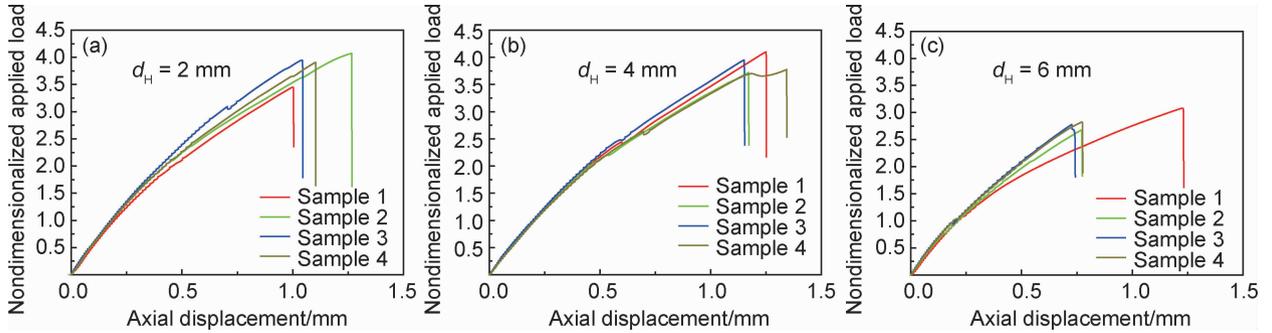


图7 不同缝合孔直径的载荷-位移曲线 (a)第5组;(b)第6组;(c)第7组

Fig. 7 Load-displacement curves with different stitching hole diameters (a)group 5;(b)group 6;(c)group 7

2.2 连接区域失效模式与演化规律

2.1节中各组实验件均由一块整体搭接成型的板材经切割制得。为了观察搭接区在整个实验过程中的表现,在制备实验件时通过精确调整切割的位置将一些实验件中的缝合孔切开,使缝线露在实验件边缘以便观察。图8为一件切开缝合孔的实验件的载荷-位移曲线,图9为该实验件在对应的载荷所记录下的切面形貌,图9(a)~(d)对应的是图8的点a~d。

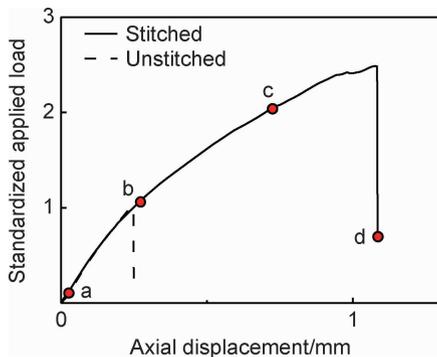


图8 搭接区失效观察实验中实验件的载荷-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curve in lap-zone failure experiment

实验开始时实验件各部分均保持完整,如图9(a)所示。实验件左侧的3DWC/钛合金混杂板由试验机上夹头夹持,施加向上的载荷;实验件右侧的混杂板由试验机下夹头夹持固定。

当实验中载荷约为1.1倍的对照组失效载荷时,位于剪切面上的3DWC与钛合金之间的界面已经失效,搭接接头的两搭接边出现了相对位移,如图9(b)所示。缝线与钛合金板的接触区域附近剪切强度较差的纬纱上萌生了 45° 的裂纹。

图9(c)所示的是当实验中载荷约为2倍的对照组失效载荷时裂纹的扩展情况。此时裂纹扩展并贯穿了纬纱后,贯穿了一层基体材料,扩展到了缝线处,沿缝线与3DWC之间的界面扩展了一定距离。缝线上方的交织经纱与缝线之间以及缝线下方的交织经纱与纬纱之间,纬纱与缝线之间也萌生了裂纹。

当实验件失效时,各处裂纹相比于载荷为2倍对照组平均失效载荷时均发生了不同程度的扩展,如图9(d)所示,缝线上方的裂纹又穿过了一层基体与一层纬纱-缝线界面。缝线下方的裂纹向左扩展了一定的距离。观察到的缝线靠近中央钛合金板右侧的位置萌生了一条竖直的裂纹,如图9(g)所示。缝线并未完全断裂。

2.3 缝线与搭接区失效模式

在实验中,观察到了搭接区的3种失效模式,分别为:

(1)缝线纯剪断模式

缝线在加载过程中受到实验件两搭接边对其施加的剪切应力超过了缝线的剪切强度,在实验件中部剪切面处(3DWC层II与Ti层I之间)发生断裂。在缝合孔直径大的实验件中由于缝合孔内的环氧树脂强度低,在加载的过程中被挤碎,缝合孔无法对缝线起到支撑作用,在此种情况下,缝线上的剪切应力由两搭接边的3DWC施加,缝线的断裂点也出现了相应的偏移,故在缝合孔直径大的组中观察到了部分缝线在Ti层I与3DWC层I之间界面处发生断裂的情况。

在此种失效模式中,所有的缝线在接头失效时均发生了剪切破坏。两块3DWC/钛合金混杂板完全脱离,如图10所示。

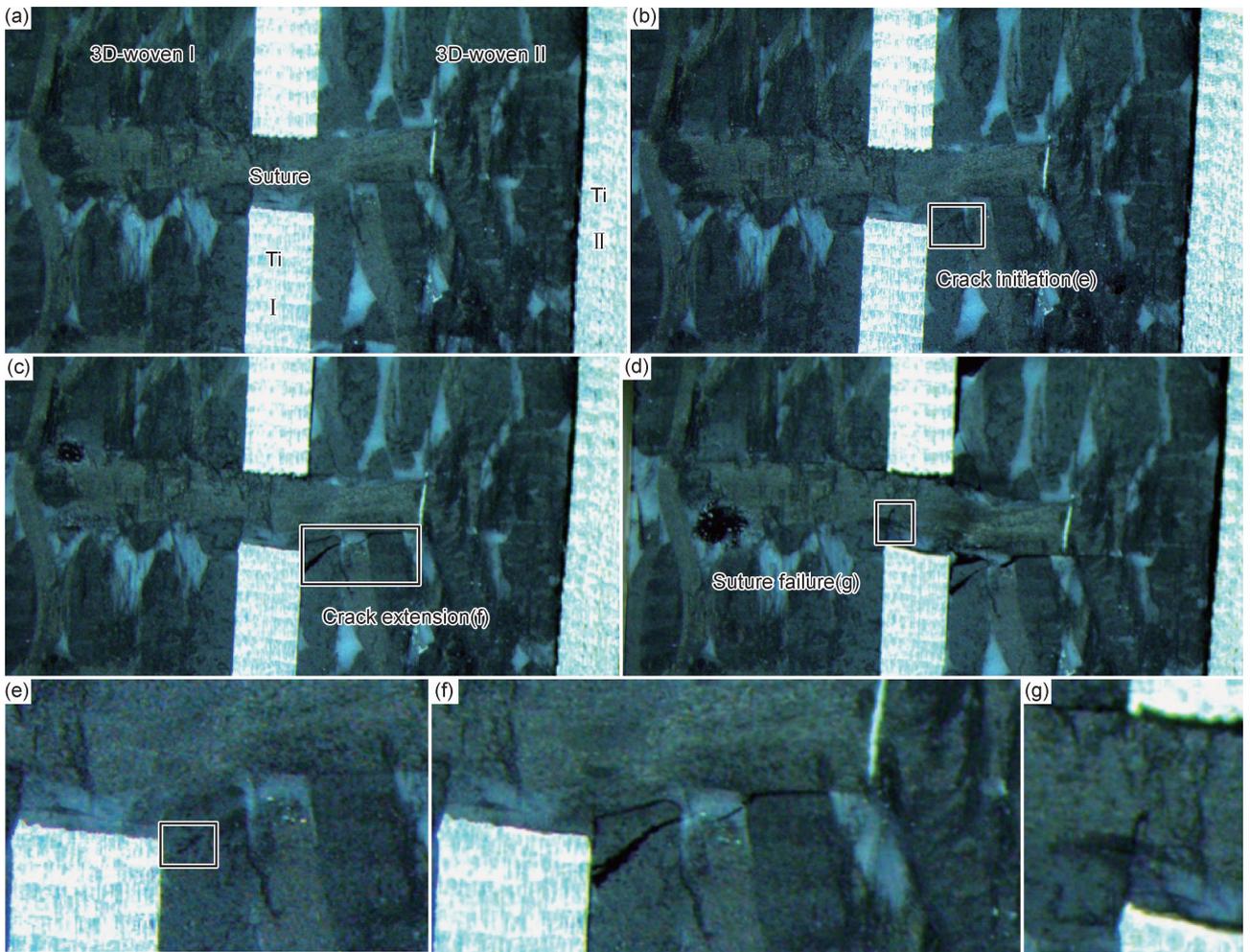


图 9 不同载荷状态下连接区的细观损伤形貌

(a)实验开始时完好的搭接区;(b)剪切面失效后的搭接区;(c)载荷等于 2 时的搭接区;
(d)失效后的搭接区;(e)图(b)中的裂纹萌生;(f)图(c)中的裂纹扩展;(g)图(d)中的缝线失效

Fig. 9 Mesoscopic damage in different load status

(a)lap zone when the test begun;(b)lap zone after shear interface failure;(c)lap zone when the load=2;
(d)lap zone after the joint failed;(e)crack initiation in fig. (b);(f)crack extension in fig. (c);(g)suture failure in fig. (d)

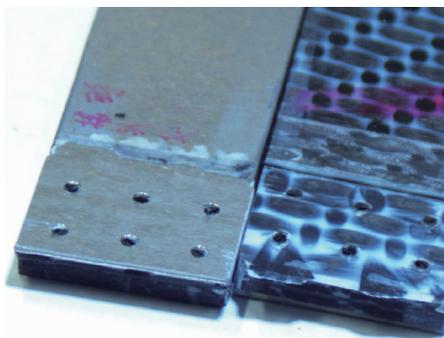


图 10 缝线纯剪断模式

Fig. 10 Suture cut off mode

(2)缝线抽出与剪断混合模式

在部分实验件中,由于缝线对 3DWC 的挤压,3DWC 内部会萌生裂纹并在加载过程中不断扩展,最

终会导致缝线与 3DWC 之间的界面失效,缝线与 3DWC 之间的力由较强的范德华力转变为较弱的摩擦力。在后续的加载中缝线被从 3DWC 中部分或全部拔出。

在此种失效模式中,一些缝线在钛合金与 3DWC 之间的剪切面附近发生了剪切破坏;其余缝线与 3DWC 之间的界面失效后被从 3DWC 中抽出或部分抽出。在观察到的情况中,由于缝线与 3DWC 在其界面失效后仍有一定的剩余强度,大部分此种失效模式的实验件在搭接区失效后并未完全脱开。图 11(a)为该种失效模式的典型形式,搭接的两片 3DWC /钛合金混杂板在接头失效后并未完全脱开。图 11(b)为接头失效后的两搭接边完全分离的情况,可以看到有两根缝线被从 3DWC 中抽出。

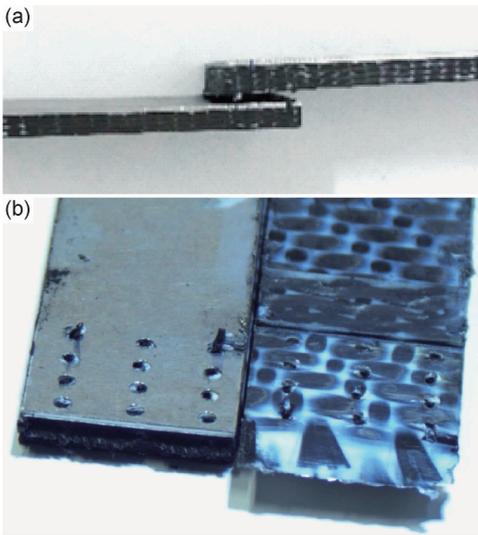


图 11 缝线抽出与剪断混合模式

(a)两搭接边未分离;(b)两搭接边分离

Fig. 11 Suture cut off & pull out mixed mode

(a)unseparated joint;(b)separated joint

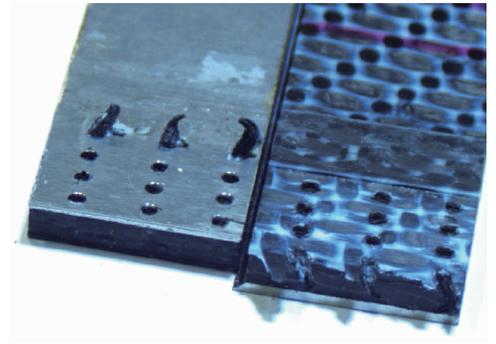


图 12 缝线挤出与剪断混合模式

Fig. 12 Suture extrusion & cut off mixed mode

(3)缝线挤出与剪断混合模式

在第 2 组 ($4\text{ mm} \times 8\text{ mm}$, 48 k , $d_{\text{H}} = 2\text{ mm}$) 的实验件中,观察到了部分实验件出现了最靠近边缘一侧的缝线压溃了 3DWC 层,沿拉伸方向挤出,其余缝线被剪断的失效模式(与文献[17]中情况类似),如图 12 所示。较大的缝合密度使得缝线与 3DWC 边缘之间距离缩短,在拉伸方向上承受最外侧缝线挤压的 3DWC 变少。48 k 缝线的剪切强度较高,在被剪断前压溃了 3DWC,故产生了此种失效模式。第 1 组由于使用了强度较低的 24 k 缝线,缝线均被剪断,未观察到此种失效模式。

由于钛合金层的存在,使得混杂板的抗拉强度显著提高,从而在此次实验中未观察到参考文献[12-13]中所提到的一侧材料整体断裂以及一侧材料部分断裂这两种情况。

2.4 缝合参数对接头失效模式的影响

表 3 所示为各个实验件的接头失效模式。从表 3 中可以发现,缝合密度对接头失效模式影响最为显著,缝合密度高的 24 k, $4\text{ mm} \times 8\text{ mm}$, $d_{\text{H}} = 2\text{ mm}$ (第 1 组)中,接头失效模式均为缝线抽出/剪断混合模式,随着缝合密度的不断降低,接头失效模式逐渐从缝线抽出/剪断混合模式向缝线纯剪断模式转变。缝合密度为 $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的第 4~7 组共 16 个实验件中仅观察到 3 个实验件接头出现了缝线抽出/剪断混合模式的失效,其余接头失效模式均为缝线纯剪断模式。在缝合密度高的情况下,使用 48 k 碳纤维代替 24 k 碳纤维作为缝线会使失效模式向缝线挤出/剪断混合模式变化。缝合孔直径对接头失效模式无明显影响。

表 3 各组实验件失效模式

Table 3 Failure mode of samples

Group	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
1	Cut off & pull out	Cut off & pull out	Cut off & pull out	Cut off & pull out
2	Extrusion & cut off	Extrusion & cut off	Extrusion & cut off	Cut off & pull out
3	Cut off	Cut off & pull out	Cut off	Cut off & pull out
4	Cut off	Cut off & pull out	Cut off	Cut off
5	Cut off	Cut off & pull out	Cut off	Cut off
6	Cut off	Cut off	Cut off	Cut off
7	Cut off & pull out	Cut off	Cut off	Cut off
8	Unstitched	Unstitched	Unstitched	Unstitched

3 结论

(1)使用 48 k 的碳纤维代替 24 k 的碳纤维作缝线能使接头失效载荷提升 24.3%,缝合密度为 $4\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 以及 $6\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的接头的失效载荷比缝合密

度为 $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的接头分别高出 82.0% 和 40.5%;在设计中应优先考虑通过增加缝合密度的方法来提升接头强度;增大预制缝合孔直径会略微降低结构的剪切刚度,缝合孔过大会导致结构的抗剪切能力大幅下降,故缝合孔直径应控制在 4 mm 以下。

(2) 搭接区的失效模式有缝线纯剪断、缝线抽出与剪断混合以及缝线挤出/剪断混合 3 种。缝合密度对接头的失效模式影响较大,缝合密度为 $4\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 时接头失效模式以缝线抽出/剪断混合模式为主,随着缝合密度的降低,接头的失效模式向缝线纯剪断模式转变,缝合密度为 $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 时接头失效模式以缝线纯剪断模式为主;在缝合密度 $4\text{ mm} \times 8\text{ mm}$,缝线规格 48 k 的组中观察到了缝线挤出/剪断混合模式。

参考文献

- [1] 乔海涛,梁滨,张军营,等. 先进复合材料结构胶接体系的研发与应用[J]. 材料工程,2018,46(12):38-47.
QIAO H T, LIANG B, ZHANG J Y, et al. Development and application of adhesive materials for advanced composite bonding [J]. Journal of Materials Engineering, 2018,46(12):38-47.
- [2] 曲春艳,李琳,王德志. 钛合金胶接表面处理研究[J]. 材料工程,2010(12):82-85.
QU C Y, LI L, WANG D Z. Study on surface treatment of titanium alloy for adhesive bonding [J]. Journal of Materials Engineering, 2010(12):82-85.
- [3] WANG S N, LI Y, GUO Y, et al. Development of a two-component structural adhesive for bonding of metals and polymeric composites[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019, 90: 38-46.
- [4] CAO Y J, CAO Z Q, ZUO Y J, et al. Numerical and experimental investigation of fitting tolerance effects on damage and failure of CFRP/Ti double-lap single-bolt joints[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 78: 461-470.
- [5] 余海燕,李佳旭,周辰晓. 碳纤维复合材料与高强度钢板螺栓连接拉伸性能[J]. 同济大学学报(自然科学版),2018,46(5):680-686.
YU H Y, LI J X, ZHOU C X. Tensile properties of bolted joints between CFRP and high strength steel plate[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2018, 46(5): 680-686.
- [6] VANDERKLOK A, DUTTA A, TEKALUR S A. Metal to composite bolted joint behavior evaluated at impact rates of loading[J]. Composite Structures, 2013, 106: 446-452.
- [7] GERENDT C, DEAN A, MAHRHOLZ T, et al. On the progressive failure simulation and experimental validation of fiber metal laminate bolted joints[J]. Composite Structures, 2019, 229:111368.
- [8] NGUYEN A T T, BRANDT M, FEIH S, et al. Pin pull-out behavior for hybrid metal-composite joints with integrated reinforcements[J]. Composite Structures, 2016, 155: 160-172.
- [9] TANG H Q, LIU L Q. A novel metal-composite joint and its structural performance[J]. Composite Structures, 2018, 206: 33-41.
- [10] BIGAUD J, ABOURA Z, MARTINS A T, et al. Analysis of the mechanical behavior of composite T-joints reinforced by one side stitching[J]. Composite Structures, 2018, 184: 249-255.
- [11] 李梦佳,陈普会,孔斌,等. 缝合参数对复合材料 T 型接头拉脱承载能力的影响[J]. 复合材料学报,2016,33(3):681-688.
LI M J, CHEN P H, KONG B, et al. Effects of parameters of stitching on pull-off carrying capacity of composite T-joint[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(3): 681-688.
- [12] 焦亚男,李嘉禄,韩雪梅,等. 缝合连接三维编织复合材料拉伸性能实验研究[J]. 复合材料学报,2008,25(1):127-132.
JIAO Y N, LI J L, HAN X M, et al. Experimental investigation on tensile property of stitching joint 3D braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(1):127-132.
- [13] 焦亚男,李嘉禄,韩雪梅. 三维编织复合材料缝合连接设计及破坏机制[J]. 纺织学报,2008,29(6):48-51.
JIAO Y N, LI J L, HAN X M. Design and destroying mechanism of stitching joint 3-D braided composites [J]. Journal of Textile Research, 2008,29(6): 48-51.
- [14] JAIN L K, LEONG K H, MAI Y W, et al. Effect of through-thickness stitching on the fatigue life of composite single-lap joints[J]. Applied Composite Materials, 1998, 5: 399-409.
- [15] GHASEMNEJAD H, ARGENTIERO Y, TEZ T A, et al. Impact damage response of natural stitched single lap-joint in composite structures[J]. Materials & Design, 2013, 51: 552-560.
- [16] MOURITZ A P, COX B N. A mechanistic approach to the properties of stitched laminates[J]. Composites; Part A, 2000, 31(1): 1-27.
- [17] AN W J, KIM C H, CHOI J H, et al. Static strength of RTM composite joint with I-fiber stitching process[J]. Composite Structures, 2019, 210: 348-353.

收稿日期:2019-11-27;修订日期:2020-03-12

通讯作者:陈秀华(1977—),男,高级工程师,博士,研究方向为复合材料结构设计与实验,联系地址:上海市闵行区东川路 800 号上海交通大学航空航天学院(200240),E-mail: chenxiuhua@sjtu.edu.cn

(本文责编:解 宏)