

引文格式: 李泽江, 周良道, 姚学锋. 三维六向编织复合材料 T 型接头拉脱性能试验研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(23/24): 110-115, 132.  
LI Zejiang, ZHOU Liangdao, YAO Xuefeng. Experimental research on pull-off properties of three-dimension six-directional braided composite T-joints[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(23/24): 110-115, 132.

## 三维六向编织复合材料 T 型接头拉脱性能试验研究

李泽江<sup>1</sup>, 周良道<sup>1</sup>, 姚学锋<sup>2</sup>

(1. 中国商飞上海飞机设计研究院, 上海 201210;  
2. 清华大学, 北京 100084)

[摘要] 将复合材料三维编织结构优越特性与 T 型接头整体化需求相结合, 采用树脂传递模塑 RTM 液体成型工艺, 设计制造了三维六向编织复合材料 T 型接头, 针对不同的编织角 (20°、30°、40°) 及不同的纱线束 (6k、9k、12k) 下的拉脱性能进行试验研究。试验结果表明, 在拉脱载荷作用下, 编织角对三维六向编织 T 型接头的拉脱性能影响很大, 编织角从 20° 变为 40° 时, 拉脱载荷提高了 53%; 而纱线束对三维六向编织 T 型接头的拉脱性能基本没有影响。纱线从 6k 变为 12k 时, 仅增加了约 8%; 拉脱破坏模式均为 T 型接头的侧板与底板发生分离。研究成果对整体化复合材料结构设计及研制具有重要的试验指导作用。

关键词: 三维编织复合材料; T 型接头; 拉脱性能; 编织角; 破坏模式

### Experimental Research on Pull-Off Properties of Three-Dimension Six-Directional Braided Composite T-Joints

LI Zejiang<sup>1</sup>, ZHOU Liangdao<sup>1</sup>, YAO Xuefeng<sup>2</sup>

(1. COMAC Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China;  
2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[ABSTRACT] Using good inter-laminar property of three-dimensional braided composite to meet the requirement of the integral T-joints structure, a T-joints structure has been designed and manufactured with using resin transfer liquid composite molding and 3D six-directional braided composites. The pull-off damage property of the T-joints structure has been studied by tests for different braiding angles (20°, 30°, 40°) and yarns (6k, 9k, 12k). It has been shown by the tests that the damage type of T-joints structure with 3D six-directional braided composites is the web pulling away from the flange; The T-joints structure pull-off strength increased by 53% when braiding angle changing from 20° to 40° for the same braiding yarns and by 8% when braiding yarns changing from 6k to 12k for the same braiding angle. The research results can be an important experimental guidance for the design and development of integrated composite structure.

Keywords: 3D braided composite; T-joints; Pull-off properties; Braiding angle; Damage

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.23/24.110

复合材料 T 型接头是航空、航天领域中典型的整体化结构形式, 目的是通过有效整合紧固件及零件数量, 减少应力集中、降低结构重量, 是复合材料结构发展的趋势之一<sup>[1-3]</sup>。三维编织复合材料以整体编织预成型件作为增强材料, 不需缝合、粘接和机械加工, 具有较高的

强度、刚度和较好的抗冲击性、耐烧蚀性等, 是航空、航天领域的重要结构材料<sup>[4-6]</sup>。

复合材料 T 型接头和复合材料三维编织结构一直是国内外学者的研究热点。在复合材料 T 型接头方面, 国内外学者研究了复合材料 T 型接头承受静态和动态

拉伸载荷的失效行为及破坏模式<sup>[7-8]</sup>,试验发现复合材料 T 型接头在拉伸载荷下,在 R 区率先破坏失效;朱程燕等<sup>[9]</sup>指出 T 型接头在拉伸载荷下,脱粘首先发生在三角填充区并向突缘扩展;Kesavan 等<sup>[10]</sup>基于神经网络技术开发了实时系统来检测 T 型接头损伤的位置及程度。在数值模拟方面,国外学者利用虚拟裂纹闭合技术及渐进损伤技术等分析 T 型接头在拉伸载荷下拉脱性能<sup>[11-14]</sup>;朱亮<sup>[15]</sup>和朱闯锋<sup>[16]</sup>等建立了黏聚区模型,预测出含填充物缺陷复合材料 T 型接头的裂纹扩展。为了加强 T 型接头的拉脱性能,利用 Z-pin、缝合工艺及三维编织工艺对复合材料层合板进行了增强,李梦佳<sup>[17]</sup>、孔斌<sup>[18]</sup>等研究发现 Z-pin 参数对复合材料 T 型接头拉脱性能影响较大,而对剪切承载能力几乎无显著作用。余坤<sup>[19]</sup>、文立伟<sup>[20]</sup>和 Bigaud<sup>[21]</sup>等则对缝合复合材料 T 型加筋壁板的拉脱、抗剪与抗弯性能进行研究。陈光伟<sup>[22]</sup>、张中伟<sup>[23]</sup>和刘军<sup>[24]</sup>等采用试验及数值分析方法研究了三维编织复合材料 T 型梁的抗弯性能并揭示其破坏机理。王欢等<sup>[25]</sup>采用悬臂梁自由衰减振动法研究三维编织复合材料 T 型梁的模态性能,发现纤维体积分数越大,固有频率越高。Zhang 等<sup>[26]</sup>研究了三维编织复合材料 T 型梁在高温环境下受到冲击时的破坏模式。Ouyang 等<sup>[27-28]</sup>通过试验和数值方法研究三维五向 T 型梁的弯曲疲劳性能。清华大学 Fu<sup>[29-30]</sup>、Gao<sup>[31]</sup>和 Gong<sup>[32]</sup>等针对三维编织结构的制造、成型、缺陷分布、力学性能、结构件承载能力进行了系统的研究,获得了三维编织复合材料内部缺陷及残余应力形成机理,建立了含缺陷编织复合材料的本构模型,预测了含缺陷编织件的力学性能,提出了编织复合材料的优化成型方法,为三维编织复合材料的研究提供了关键理论依据。

综上,目前针对三维编织复合材料 T 型结构的研究主要集中在探究编织工艺、试样长度、加强筋高度等对其结构本身的拉伸、剪切、弯曲、热力耦合及模态性能的影响,而对三维编织复合材料 T 型接头编织工艺在拉脱载荷作用下的力学性能及失效机理却关注较少。本研究通过试验研究了三维六向编织复合材料 T 型接头在拉脱载荷下的编织角和纱线束对其力学性能的影响,并采用数字散斑相关方法观测破坏现象并探讨其失效机理。

## 1 试样件

### 1.1 材料及成型工艺

本次试样件所用三维编织复合材料的树脂为天津东化工厂生产的 TDE-86# 环氧树脂;三维编织复合材料中的碳纤维为日本东丽的 T300,三维编织件中纤维体积含量为 58%。试件采用三维六向的编织工艺,利用树脂传递模塑(Resin transfer moulding, RTM)成型

工艺对预制件进行复合固化。试样件均为天津工业大学复合材料研究所制备,组分材料的力学性能如表 1 所示。

### 1.2 试样件类型

T 型接头是常用的承载结构,常用于传递相互垂直各面之间的载荷,如将翼面气动力传递给翼肋和翼梁腹板等<sup>[15]</sup>。三维编织复合材料 T 型接头的腹板和翼板相互垂直,是典型结构形式,本研究设计的 T 型接头截面几何尺寸见图 1,纵深长 50 mm。

三维编织复合材料的编织角及纱线束对 T 型接头的结构力学性能有重要影响<sup>[5]</sup>,本次试验 T 型接头的工艺参数(编织角及纱线束)及试验项目数量如表 2 所示。

## 2 拉脱试验

### 2.1 试验标准及判据

本次拉脱试验参照 ASTM D6671 和 DIN EN 6034 以及 ASTM D5528,设计了三维编织复合材料 T 型接头拉脱试验,研究在不同编织角和纱线束下 T 型接头的腹板和翼板之间的失效载荷和失效模式。以载荷降低到最大加载载荷的 50% 作为失效判据,认为此时试样完全破坏,试验停止。

表 1 碳纤维和环氧树脂的力学性能

Table 1 Mechanical properties of carbon fiber and epoxy resin

性能	纤维	基体
$E_{11f}/\text{GPa}$	221	—
$E_{22f}/\text{GPa}$	13.8	—
$G_{12f}/\text{GPa}$	13.8	—
$\nu_{12f}$	0.2	—
$E_m/\text{GPa}$	—	3
$\nu_m$	—	0.4
$F_{tu}/\text{MPa}$	3500	10

注:  $E_{ijf}$ 、 $G_{ijf}$ 、 $\nu_{ijf}$  为弹性模量、剪切模量、泊松比( $i, j=1, 2, 3$ );  $f$  为纤维;  $m$  为基体。

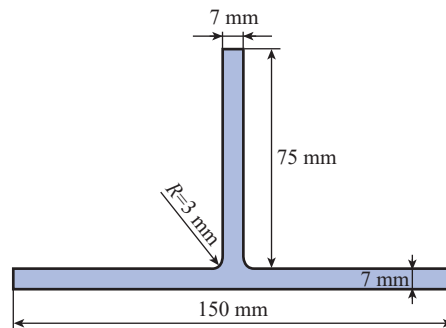


图 1 T 型接头截面几何尺寸

Fig.1 Size of T-joints sample

## 2.2 仪器及参数设定

本次试验环境为温度  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度  $50\% \pm 10\%$ 。试验在清华大学教育部应用力学重点试验室进行,采用 WD4000 电子万能试验机进行拉脱试验,试验机加载速度为  $0.5\text{ mm/min}$ ,试验机记录 T 型接头的载荷-位移曲线。采用 YE2538A 静态应变仪对应变片的数据进行采集测量,应变仪采样频率为  $1\text{ Hz}$ 。利用 CCD 静态图像采集仪 (DH-HV1351UM) 及镜头 (M3Z1228C-MP),采用非接触光学测试方法-数字散斑相关技术,定时拍摄照片,用计算机采集应变、位移和载荷信息,记录 T 型接头的损伤扩展情况,直至试样破坏。

## 2.3 加持方式及应变布置

为了对三维六向编织复合材料 T 型接头进行拉脱试验,设计制作了专用夹具,如图 2 所示。T 型接头试样的垂直端(侧边)由刚性平台支撑,T 型接头试样件平行的两端(底边)由两块刚性板固定,试验时,上加载端夹持试样的垂直端(侧边)并以一定速率上移施加拉脱载荷,直至最终试样件破坏。

为了测量 T 型接头在拉脱过程中的变形,在试件变形的关键部位布置了电阻应变片,用电阻应变片和数字散斑技术记录分析试样在拉脱过程中的受载状况,并观察其失效模式。 $SA_1$ 、 $SA_2$  和  $SA_3$  为  $120^\circ$  等角应变花,粘贴于 T 型接头结合部; $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  为单片,粘贴于底边和侧边厚度方向的中部,如图 2 所示。

表 2 T 型接头的工艺参数及试验项目  
Table 2 Types and process parameters of T-joints

试验类型	编号	编织角 / ( $^\circ$ )	纱线细度	数量
I	$T_1 \sim T_3$	20	6k	3
II	$T_4 \sim T_6$	30	6k	3
III	$T_7 \sim T_9$	40	6k	3
IV	$T_{10} \sim T_{12}$	20	9k	3
V	$T_{13} \sim T_{15}$	20	12k	3

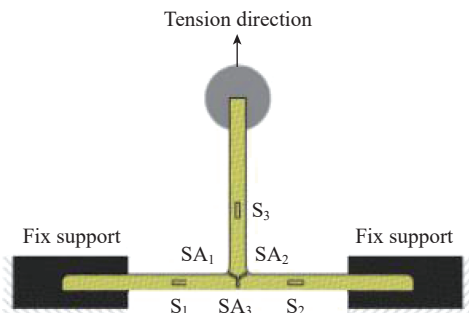


图 2 T 型接头试验及应变片布置示意图  
Fig.2 Schematic diagram of T-joint test and strain

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 拉脱试验结果

三维六向编织复合材料 T 型接头拉脱破坏试验的失效模式相同,均是 T 型接头侧板从底板上拉断,其失效模式为连接处织物纤维发生断裂,因此,T 型接头的交叉连接部位是最薄弱的环节,且在试验加载过程中时常伴随着细微的纤维或基体断裂的响声。

图 3 (a)~(c) 分别给出了  $20^\circ$  编织角下纱线分细度别为 6k、9k 和 12k 的试样件破坏示意图,可以看到,不同纱线形成的断口存在差异,纱线细度小的断口(图 3 (a))相对于纱线细度大的断口(图 3 (c))较为平整;图 3 (d) 为  $20^\circ$  编织角、纱线细度为 12k 的 T 型接头破坏后的断口图片,由于纱线较粗,可以清晰地看到单捆纱线纤维整体断裂后形成的锯齿状。

三维六向编织复合材料 T 型接头拉脱破坏试验的拉脱载荷及其平均值统计结果如表 3 所示。

### 3.2 编织角对拉脱载荷的影响分析

图 4 为纱线细度 6k, 编织角分别为  $20^\circ$ 、 $30^\circ$  和  $40^\circ$  的拉脱载荷-位移曲线。不同于常规使用复合材料层合板形成的 T 型接头,其拉脱破坏特点是从 T 型接头填料区开始发生破坏,层间脱胶是导致整个结构失效的主要原因,脱胶时瞬间承载能力发生较大的下降<sup>[1]</sup>,从图 4 可以明显看出,在破坏发生时载荷下降是缓慢的,到一定程度后才突然失去承载能力。

从图 4 还可以发现,T 型接头的拉脱载荷随着编织角的增加而增加,编织角从  $20^\circ$  增加到  $40^\circ$  时,最大拉脱载荷提高了 53%,这表明编织角可以有效提高 T 型结构抗拉脱的性能。在同样的纱线束下,三维编织编织角越大,T 型接头腹板与翼边的交叉处受载越直接,从

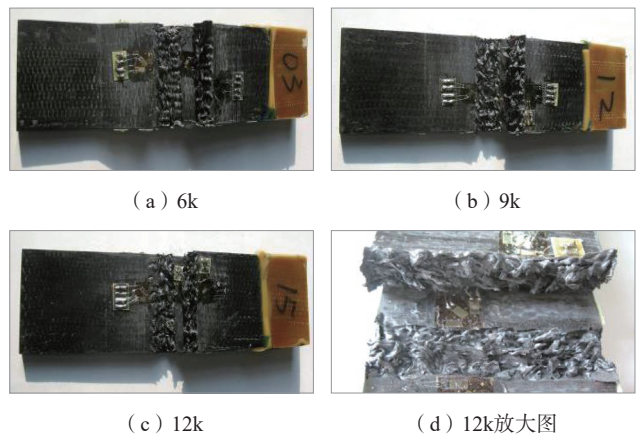


图 3 不同纱线细度的试样件断裂模式 ( $20^\circ$  编织角)  
Fig.3 Fracture modes of samples with different yarns (braiding angle  $20^\circ$ )

图4 载荷-位移曲线初始斜率可以看出,其刚度越大,抵抗T型接头纵向的载荷也越大。而随着编织角的减小,T型接头横向刚度逐渐增大,其抵抗横向载荷随之增大,在发生破坏时,载荷曲线也随之变得缓慢。

### 3.3 纱线束对拉脱载荷的影响分析

图5所示为三维六向编织复合材料T型接头编织角 $20^\circ$ 时,纱线分别为6k、9k和12k时的拉脱载荷-位移曲线。可以发现,随着纱线的增粗,T型接头的最大拉脱载荷也略有增加。在编织角为 $20^\circ$ 时,最大拉脱载荷均值从纱线束6k增加到12k仅增加了约8%,可见,利用纱线增粗来提高T型结构抗拉脱性能远不如增加编织角的效果好。在编织角相同的情况下,从载荷-位移曲线初始斜率可以看出,随着纱线束的变化,其刚度变化不大。

在相同纤维体积分量和相同编织角下,基于三维编织空间网络互锁特征,随着纱线束的变小,T型接头纤维布置更为均匀,其抵抗横向和纵向载荷也变得均匀,当其中的部分纤维发生破坏时,不会导致T型接头整体快速失去承载能力,能比较有效地抑制损伤的扩展,所

以其载荷曲线也随之变得缓慢,如图5中6k( $T_3$ )曲线所示。相反,随着纱线束的变大,部分纤维束发生破坏,其整体承载能力下降速度也随之变大,表现出一定的脆性特征。

### 3.4 T型接头连接处全场应变测量分析

数字散斑相关方法作为一种新的试验力学方法,被广泛应用于材料变形和应变的测量<sup>[33]</sup>。T型接头一般破坏部位在侧板与底板的连接处,其连接处的全场变形可反映T型接头的失效模式。图6分别给出了6k纱线下编织角为 $40^\circ$ 的三维六向编织复合材料T型接头3个阶段载荷下的数字散斑图( $T_7$ 试件)。图6(a)是试验开始前的散斑图;图6(b)是T型接头拉脱载荷达到7.3kN时的散斑图,其中红色标记处出现了细微的裂纹;图6(c)是T型接头破坏时的散斑图,可以发现侧板与底板出现拉脱分离。从图6(b)还可以看出裂纹最先在T型接头R区产生并逐步沿着纵向(底板厚度方向)扩展,扩展到一定程度后再往横向扩展,最终侧板从底板中拔出,发生断裂。

图7<sup>[9,16]</sup>给出了典型复合材料层合板T型接头拉脱破坏模式。对比图6和7可以看出,三维编织复合材料T型接头的破坏模式与典型复合材料层合板T型接头拉脱破坏模式存在明显的差异,传统的层合板层间性能较差,在拉脱载荷作用下一般表现为层合板发生层间分离导致承载能力下降,而三维编织复合材料T型接头破坏模式不再是分层,而是纤维发生断裂,这是由于三维编织复合材料的空间网络互锁结构,纤维与纤维之间结合紧密,有效抑制了分层产生。基于该编织的特性,相比典型复合材料层合板T型接头,三维编织复合材料T型接头的拉脱性能将大大提高。

图8为 $T_7$ 试件(6k纱线细度、编织角 $40^\circ$ )应变-拉脱载荷曲线图,其中 $SA_1$ 、 $SA_2$ 、 $SA_3$ 和 $S_3$ 应变片粘贴

表3 T型接头拉脱试验载荷  
Table 3 Pull-off load of T-joints

试验类型	编号	编织角/ $(^\circ)$	纱线细度	平均值/kN
I	$T_1 \sim T_3$	20	6k	$6.20^{+0.20}_{-0.12}$
II	$T_4 \sim T_6$	30	6k	$7.95^{+0.64}_{-0.35}$
III	$T_7 \sim T_9$	40	6k	$9.50^{+1.81}_{-1.16}$
IV	$T_{10} \sim T_{12}$	20	9k	$6.45^{+0.30}_{-0.20}$
V	$T_{13} \sim T_{15}$	20	12k	$6.70^{+0.44}_{-0.37}$

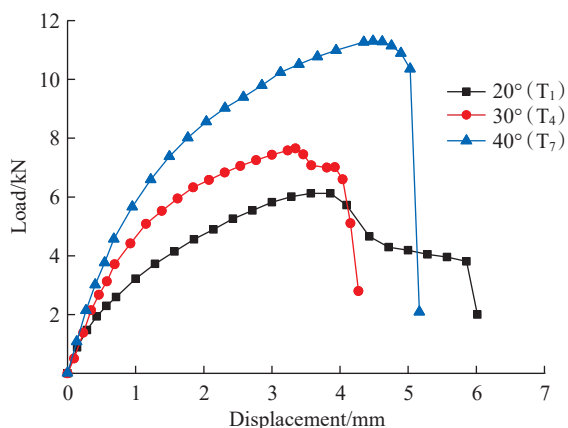


图4 T型接头6k纱线下各编织角的拉脱载荷-位移曲线  
Fig.4 Pull-off load-displacement curve of T-joints tests with 6k yarns

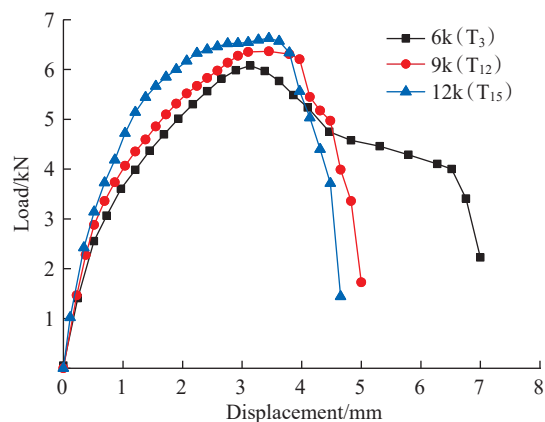


图5 T型接头 $20^\circ$ 编织角下各纱线的拉脱载荷-位移曲线  
Fig.5 Pull-off load-displacement curve of T-joints tests with braiding angle  $20^\circ$

的位置如图 2 所示。从图 8 可以看出,布置在垂直于 T 型接头 R 区法向的 SA<sub>1</sub> 和 SA<sub>2</sub> 应变两者数值相当,且远远大于 SA<sub>3</sub> 和 S<sub>3</sub> 处的应变,表明在拉脱载荷作用下, T 型接头 R 区的应力水平较高,是容易发生损伤的位置,这与图 7 中采用数字散斑相关方法观察的结果一致。

采用数字散斑相关算法,通过分析变形前后的散斑图,得到散斑沿 U 和 V 方向的相对位移,即物体沿横向和纵向的相对变形。图 9 为在 1.1 kN 拉脱载荷作用下

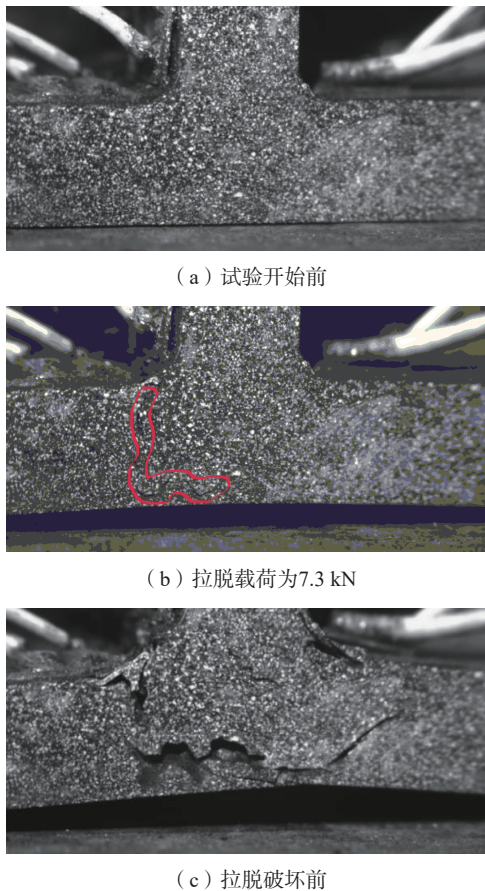


图 6 T 型接头 (T<sub>7</sub> 试件) 拉脱过程散斑图  
Fig.6 Pull-off DSCM of T-joints (T<sub>7</sub> sample)



图 7 典型复合材料层合板 T 型接头拉脱破坏模式<sup>[9,16]</sup>  
Fig.7 Pull-off test of T-joints by laminar<sup>[9,16]</sup>

纱线细度 6k、编织角 40° 的 T 型接头 (T<sub>7</sub> 试件) 底板的位移场。可以看出, T 型接头底板的变形与直梁三点弯曲类似,这是由于侧板进行加载,底板被固定在夹具底座上,形成类似于直梁的三点弯曲受力状态。

从图 9 (b) T 型接头底板水平方向变形场 (V 场) 还可得到该处的最大位移为 0.03 mm, 而由图 4 中 T<sub>7</sub> 试件拉脱载荷 - 位移曲线可知, 在 1.1 kN 拉脱载荷下的位移为 0.13 mm, 两者有一定的差别。这是由于三维六向编织复合材料 T 型接头制造过程中, 不可避免地存在内含微孔微裂纹等缺陷, 在拉脱载荷作用下, T 型接头的侧板向底板传递过程中, 这些缺陷将导致位移的增加, 图 4 和 5 的加载曲线也显示出拉脱载荷与位移呈现较为明显的非线性特征, 这也与试验加载过程中听到响

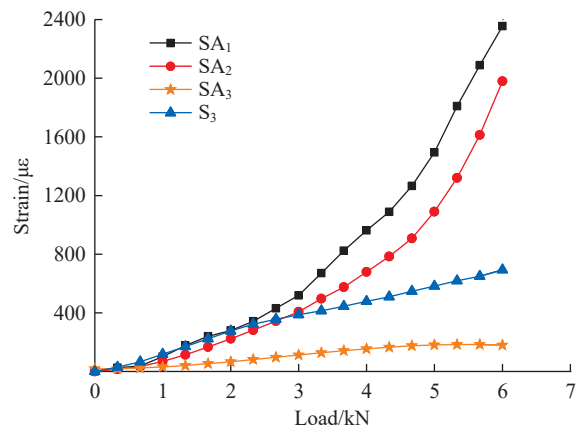
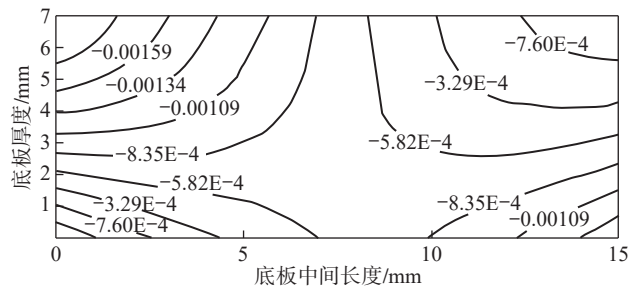
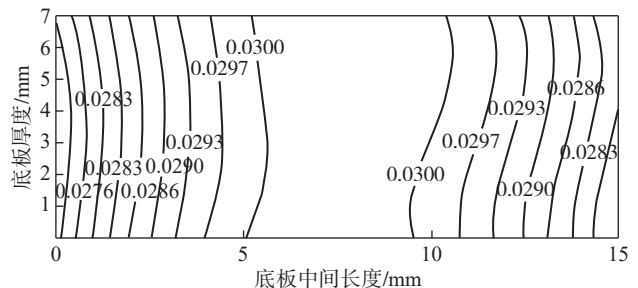


图 8 T<sub>7</sub> 试件应变 - 载荷曲线  
Fig.8 Strain-load curve of T<sub>7</sub> T-joints tests



(a) T 型接头底板垂直方向变形场 (U 场)



(b) T 型接头底板水平方向变形场 (V 场)

图 9 T 型接头底板位移场  
Fig.9 Displacement field of T-joints flange

声的现象相符合。

#### 4 结论

(1) 编织角对三维六向编织复合材料 T 型接头的拉脱性能有很大影响。编织角为 20°、30°、40° 时,其拉脱载荷平均值分别为 6.20 kN、7.95 kN、9.50 kN。编织角从 20° 变为 40° 时,拉脱载荷提高了 53%。

(2) 纱线束对三维六向编织复合材料 T 型接头的拉脱性能影响不明显。在编织角均为 20° 时,拉脱载荷均值从纱线束为 6k 时的 6.20 kN,到 9k 时的 6.45 kN,再到 12k 时的 6.70 kN,纤维束增加 1 倍拉脱载荷仅增加了 8%。

(3) 三维六向编织复合材料 T 型接头在拉脱载荷作用下,裂纹最先在 T 型接头 R 区产生并逐步沿着纵向(底板厚度方向)扩展,扩展到一定程度后再往横向扩展,最终侧板从底板中拔出,纤维发生断裂,数字散斑测量显示底板变形与三点弯曲的直梁受力变形类似。

#### 参考文献

- [1] 盛仪,熊克,卞侃,等. 拉伸状态下碳纤维复合材料 T 型接头的断裂行为[J]. 复合材料学报, 2013, 30(6): 185-190.
- SHENG Yi, XIONG Ke, BIAN Kan, et al. Fracture behavior of carbon fiber T-joints under tensile load[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(6): 185-190.
- [2] 郑锡涛,刘振东,梁晶. 大型复合材料构件固化变形分析方法研究进展[J]. 航空制造技术, 2015, 58(14): 32-35.
- ZHENG Xitao, LIU Zhendong, LIANG Jing. Research progress of curing deformation analysis method for large composite structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(14): 32-35.
- [3] 李君,姚学锋,刘应华,等. 复合材料 T 型整体化结构固化翘曲变形模拟[J]. 复合材料学报, 2009, 26(1): 156-161.
- LI Jun, YAO Xuefeng, LIU Yinghua, et al. Simulation on curing warpage deformation of composite T-shaped integrated structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(1): 156-161.
- [4] 汪星明,邢誉峰. 三维编织复合材料研究进展[J]. 航空学报, 2010, 31(5): 914-927.
- WANG Xingming, XING Yufeng. Developments in research on 3D braided composites[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(5): 914-927.
- [5] 卢子兴,杨振宇,李仲平. 三维编织复合材料力学行为研究进展[J]. 复合材料学报, 2004, 21(2): 1-7.
- LU Zixing, YANG Zhenyu, LI Zhongping. Development of investigation into mechanical behaviour of three dimensional braided composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(2): 1-7.
- [6] 韩振宇,梅海洋,付云忠,等. 三维编织预成型体的织造及三维编织复合材料细观结构研究进展[J]. 材料工程, 2018, 46(11): 25-36.
- HAN Zhenyu, MEI Haiyang, FU Yunzhong, et al. Research progress on preform forming and microstructure of 3D braided composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(11): 25-36.
- [7] ZHOU D W, LOUCA L A, SAUNDERS M. Numerical simulation of sandwich T-joints under dynamic loading[J]. Composites Part B: Engineering, 2008, 39(6): 973-985.
- [8] 徐云研,程小全,张纪奎,等. 复合材料蜂窝夹层结构 T 型接头拉伸性能研究[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 243-248, 256.
- XU Yunyan, CHENG Xiaoquan, ZHANG Jikui, et al. Study on composite honeycomb sandwich structure formed T-joints under tensile load[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 243-248, 256.
- [9] 朱程燕,熊克,卞侃,等. 碳纤维复合材料 T 型接头的脱粘损伤监测实验[J]. 复合材料学报, 2012, 29(6): 237-242.
- ZHU Chengyan, XIONG Ke, BIAN Kan, et al. Experiment on disbond detection on CFRP T-joint[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(6): 237-242.
- [10] KESAVAN A, DEIVASIGAMANI M, JOHN S, et al. Damage detection in T-joint composite structures[J]. Composite Structures, 2006, 75(1-4): 313-320.
- [11] LI H C H, DHARMAWAN F, HERSZBERG I, et al. Fracture behaviour of composite maritime T-joints[J]. Composite Structures, 2006, 75(1-4): 339-350.
- [12] BLAKE J I R, SHENOI R A, HOUSE J, et al. Progressive damage analysis of Tee joints with viscoelastic inserts[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001, 32(5): 641-653.
- [13] MA X S, LIU H G, BIAN K, et al. A numerical and experimental study on the multiple fracture progression of CFRP T-joints under pull-off load[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 177: 105541.
- [14] MA X S, BIAN K, LIU H G, et al. Numerical and experimental investigation of the interface properties and failure strength of CFRP T-stiffeners subjected to pull-off load[J]. Materials & Design, 2020, 185: 108231.
- [15] 朱亮,崔浩,李玉龙,等. 含缺陷复合材料 T 型接头失效数值分析[J]. 航空学报, 2012, 33(2): 287-296.
- ZHU Liang, CUI Hao, LI Yulong, et al. Numerical simulation of the failure of composite T-joints with defects[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(2): 287-296.
- [16] 朱闯锋,夏新华,马学仕. 复合材料 T 型接头拉伸断裂行为的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(13): 5592-5596.
- ZHU Chuangfeng, XIA Xinhua, MA Xueshi. Numerical simulation of tensile fracture behavior of composite T-joints[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(13): 5592-5596.
- [17] 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 Mengjia, CHEN Puhui, KONG Bin, 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.
- [18] 孔斌,陈普会,李梦佳,等. Z-pin/缝合对复合材料 T 型接头剪切承载能力的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(4): 834-842.
- KONG Bin, CHEN Puhui, LI Mengjia, et al. Effect of Z-pin/stitching on the shear carrying capacity of composite T-joints[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(4): 834-842.
- [19] 余坤,文立伟,宦华松. 缝合复合材料 T 型加筋壁板的抗剪与抗弯性能[J]. 材料导报, 2021, 35(16): 16190-16194.
- YU Kun, WEN Liwei, HUAN Huasong. Shearing and bending performance of stitched composite T-stiffened panel[J]. Materials Reports, 2021, 35(16): 16190-16194.

(下转第 132 页)

[13] ALDRIN J C, SABBAGH H A, MURPHY R K, et al. Demonstration of model-assisted probability of detection evaluation methodology for eddy current nondestructive evaluation[J]. AIP Conference Proceedings, 2012, 1430(1): 1733–1740.

[14] 刘宇, 刘国鹏, 曲嘉伟, 等. 电火花加工中热爆炸力对材料抛出过程影响的仿真研究[J]. 机电工程技术, 2022, 51(8): 6–9, 117.

LIU Yu, LIU Guopeng, QU Jiawei, et al. Simulation study on the influence of thermal explosion force on material ejection process in EDM[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(8): 6–9, 117.

[15] DEMEYER S, JENSON F, DOMINGUEZ N, et al. Transfer function approach based on simulation results for the determination of pod curves[J]. AIP Conference Proceedings, 2012, 1430(1): 1757–1764.

[16] MEYER R M, CRAWFORD S L, LAREAU J P, et al. Review of literature for model assisted probability of detection[R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2014.

[17] MUKHERJEE S, ROSELL A, UDPA L, et al. Differential geometry based model for eddy current inspection of U-bend sections in steam generator tubes[J]. AIP Conference Proceedings, 2017, 1806(1): 110023.

[18] KOSHTI A M. Assessment of flaw detectability using transfer function[C]//Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, Civil Infrastructure, and Transportation XV. SPIE, 2021, 11592: 153–166.

[19] BALLISAT A. A general approach to model assisted qualification of non-destructive inspections[D]. Bristol: University of Bristol, 2019.

[20] HEEBL J, LINDGREN E, MELSON R. Progress in development of a transfer function for an-gle beam ultrasonic inspections[J]. AIP Conference Proceedings, 2010, 1211(1): 1887–1894.

[21] ALI M S S A, KUMAR A, RAJAGOPAL P. Signal noise based transfer function approach for reliability estimation of ultrasonic inspection[J]. Ultrasonics, 2019, 96: 276–283.

[22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属薄板(带)轴向力控制疲劳试验方法: GB/T 26076—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metal sheets and strips-axial-force-controlled fatigue testing method: GB/T 26076—2010[S]. Beijing: China Standards Press, 2011.

通讯作者: 宋凯, 教授, 博士, 研究方向为电磁无损检测新技术及仪器。

(责编 阳光)

(上接第 115 页)

[20] 文立伟, 余坤, 宦华松. 缝合复合材料 T 型接头拉伸载荷下的有限元数值模拟[J]. 航空学报, 2021, 42(2): 224231.

WEN Liwei, YU Kun, HUAN Huasong. Finite element numerical simulation of stitched composite T-joint under tensile load[J]. Acta

Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(2): 224231.

[21] 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.

[22] 陈光伟, 陈利, 李嘉禄, 等. 三维多向编织复合材料 T 型梁抗弯应力分析[J]. 纺织学报, 2009, 30(8): 54–58.

CHEN Guangwei, CHEN Li, LI Jialu, et al. Study on flexural stress of T beam of 3-D multidirectional braided composites[J]. Journal of Textile Research, 2009, 30(8): 54–58.

[23] 张中伟, 严静. 三维编织复合材料 T 型梁弯曲疲劳性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(4): 42–45, 36.

ZHANG Zhongwei, YAN Jing. Bending fatigue behavior of 3D braided composite T-beam[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(4): 42–45, 36.

[24] 刘军, 刘奎, 宁博, 等. 三维编织复合材料 T 型梁的低温场弯曲性能[J]. 纺织学报, 2019, 40(12): 57–62.

LIU Jun, LIU Kui, NING Bo, et al. Bending properties of three-dimensional braided composite T-beam at low temperature[J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(12): 57–62.

[25] 王欢, 李嘉禄, 樊威. 纤维体积分数对三维编织复合材料 T 型梁模态性能的影响[J]. 材料工程, 2015, 43(9): 80–86.

WANG Huan, LI Jialu, FAN Wei. Effect of fiber volume fraction on modal properties of three-dimension braided composite T-beams[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(9): 80–86.

[26] ZHANG W, GU B H, SUN B Z. Transverse impact behaviors of 3D braided composites T-beam at elevated temperatures[J]. Journal of Composite Materials, 2016, 50(28): 3961–3971.

[27] OUYANG Y W, WANG H L, GU B H, et al. Experimental study on the bending fatigue behaviors of 3D five directional braided T-shaped composites[J]. The Journal of the Textile Institute, 2018, 109(5): 603–613.

[28] OUYANG Y W, SUN B Z, GU B H. Finite element analyses on bending fatigue of three-dimesional five-directional braided composite T-beam with mixed unit-cell model[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 52(9): 1139–1154.

[29] FU Y T, GAO X H, YAO X F. Mesoscopic simulation on curing deformation and residual stresses of 3D braided composites[J]. Composite Structures, 2020, 246: 112387.

[30] FU Y T, YAO X F, GAO X H. Micro-mesoscopic prediction of void defect in 3D braided composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 147: 106450.

[31] GAO X H, YUAN L, FU Y T, et al. Prediction of mechanical properties on 3D braided composites with void defects[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 197: 108164.

[32] GONG L H, GAO X H, YANG H, et al. Design on the driveshaft of 3D 4-directional carbon fiber braided composites[J]. Composite Structures, 2018, 203: 466–473.

[33] CAMINERO M A, LOPEZ-PEDROSA M, PINNA C, et al. Damage assessment of composite structures using digital image correlation[J]. Applied Composite Materials, 2014, 21(1): 91–106.

通讯作者: 李泽江, 高级工程师, 硕士, 研究方向为复合材料结构设计。

(责编 阳光)