

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.01.005

缝合复合材料 T 形连接件拉脱数值模拟

陈绍雄, 朱书华, 周 龙, 王星雨

(南京航空航天大学航空学院, 南京 210016)

摘要: 为研究缝线对缝合复合材料 T 形连接件拉脱承载能力的增强机理, 建立了未缝合复合材料 T 形连接件的有限元模型, 数值分析结果与已有实验数据吻合较好。同时根据缝合复合材料 T 形连接件在宽度方向上的平移对称性, 通过在模型边界加入特定的边界条件建立了缝合 T 形连接件的简化模型来模拟结构的渐进损伤过程。在此基础上, 进一步研究了缝线的位置和横截面积对 T 形连接件在拉脱载荷下力学性能的影响。结果表明: 缝线位置越靠近三角区, 缝线对结构最大承载能力的影响越大。当筋条和蒙皮缝合的位置处于三角区边缘时, 较细的缝线会减弱结构的承载能力, 而较粗的缝线则起大幅增强作用。

关键词: 缝线; T 形连接件; 平移对称性; 有限元方法; 界面脱粘

中图分类号: V214.8; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)01-0044-07

Numerical Simulation of Stitched Composite T-Joints Under Pull-Out Load

CHEN Shaoxiong, ZHU Shuhua, ZHOU Long, WANG Xingyu

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to study the strengthening mechanism of stitching thread on the pull-out load-carrying capacity of stitched composite T-joints, a finite element model of unstitched composite T-joints is established. The numerical results are in good agreement with the existing experimental data. At the same time, according to the translational symmetry of stitched composite T-joints in the width direction, a simplified model of stitched T-joints is established by adding specific boundary conditions to the model boundary to simulate the progressive damage process of the structure. On this basis, the effects of the position and cross-sectional area of the stitching thread on the mechanical properties of T-joints under pull-out load are further studied. The results show that the closer the stitching thread is to the triangle area, the more influence of the stitching thread has on the maximum bearing capacity of the structure. When the stitching position of the stiffener and skin is at the edge of the triangle area, the stitching thread with the smaller cross-sectional area will weaken the bearing capacity of the structure, while the stitching thread with the larger cross-sectional area will greatly enhance it.

Key words: stitching thread; T-joint; translational symmetry; finite element method; interlaminar cracking

缝合可以改善复合材料的层间性能, 因此这种有效而先进的纺织方法在许多领域, 特别是在航空航天领域有着广泛的应用前景^[1]。自 20 世纪 80 年代中期以来, 研究人员开始对缝合增强复合材料进行研究^[2]。与其他三维纺织结构相比, 三维缝合结

构仅需在原有层合板基础上增加一步就能改善复合材料的层间性能, 即从结构厚度方向引入缝线, 这是一种更快、更有效的方法^[3]。最初引入缝线的目的便是取代战斗机上使用的复合材料胶接和铆接^[4], 与金属材料相比, 使用缝线增强的复合材料

基金项目: 国家科技重大专项 (Y2019-I-0018-0017)。

收稿日期: 2022-06-21; **修订日期:** 2022-11-01

通信作者: 朱书华, 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, E-mail: shzhu@nuaa.edu.cn。

引用格式: 陈绍雄, 朱书华, 周龙, 等. 缝合复合材料 T 形连接件拉脱数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(1): 44-50. CHEN Shaoxiong, ZHU Shuhua, ZHOU Long, et al. Numerical simulation of stitched composite T-joints under pull-out load[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(1): 44-50.

有着更优异的层间性能,同时还能减少复合层结构因打孔而受到的损伤,而且可以用于形状更复杂的部件。然而,缝合可能会导致局部面内纤维损坏,并形成富树脂区,会对复合材料层合板的面内性能产生不利影响^[5]。

为了深入了解缝线对缝合复合材料力学性能的影响,许多研究人员^[2,6-10]在缝合复合材料层合板的拉伸、压缩、剪切、弯曲和层间断裂韧性等各方面做了大量工作。大多数研究表明,无论是在静态载荷^[6]还是疲劳载荷^[7]条件下,缝合都会降低层合板的面内拉伸性能。Mouritz等^[2]通过实验发现复合材料的极限拉伸强度随着缝线直径的增加而逐渐降低,这是由于缝合区域的增加使面内承载的纤维损伤程度增加。在适当的缝合参数下(如缝合模式、缝合密度、缝线粗细程度以及加载方向等),缝合有可能改善层合板的力学性能。Zhao等^[8]研究表明,层合板的拉伸强度不会总是随着玻璃纤维缝线直径的增加而降低,合适的直径会起到增强作用。Yudhanto等^[9]研究表明,适当缝合密度的缝合复合材料的拉伸强度会比未缝合和高密度的复合材料拉伸强度更高。Yaakob等^[10]对比了不同缝合线迹对层合板面内性能的影响,与未缝合复合材料相比,部分单向缝合复合材料的比强度增加。Arbaoui等^[11]研究表明,当压缩载荷沿缝合方向作用时,缝线本身会发生屈曲,不能起到有效的承载作用。Bigaud等^[12]在拉脱试验下,通过数字图像相关法(DIC)上的应变场设计缝合位置,以改善三角区的应力分布。燕瑛等^[13]建立了含缝线的细观模型来预测各方向的弹性模量变化。叶强^[14]将缝线的参数整合至黏聚区模型(CZM)中来分区模拟缝线对界面脱粘的抑制作用和没有缝线区域的界面损伤扩展。文立伟等^[15]通过在界面加入非线性弹簧单元来模拟缝线,非线性弹簧单元的力学性能通过细观力学方法计算得到。李梦佳等^[16]通过对缝合的参数化研究发现 T 形连接件的拉脱承载能力随缝线直径和缝合密度的增大而增大,且主要影响结构的拉脱强度。

国内外关于缝合增强层合板的研究已较为成熟,包括缝线材料、缝合技术、缝合工艺参数和缝合尺寸参数等,但对于缝合 T 形连接件的拉脱承载能力的研究却较少。而在有限元模拟的研究中,由于模型网格数量较大而不便于进行参数化研究,大都采用二维的有限元模型进行简化,没有考虑缝线在真实结构中的作用机制且应力分布也和实际结构不同。本文通过缝合 T 形连接结构的平移对称性推导出结构两侧截面上的边界条件,对三维有限元模型进行了简化;在此基础上研究了在拉脱载荷下缝线位置和横截面积对结构力学性能的影响,对

T 形连接件的缝合增强设计具有一定的指导意义。

1 T 形连接件有限元模型及验证

1.1 有限元模型

为评估和验证 T 形连接件有限元模型的有效性,本文根据文献[15]中如图 1 所示的试验件几何尺寸建立了有限元模型。T 形连接件长 200 mm,宽 40 mm,筋条高 50 mm,加载跨距为 120 mm,加载端筋条的夹持高度为 35 mm。其中蒙皮、筋条和三角区全部采用 T700/RTM3312A 复合材料,其具体参数如表 1 所示。蒙皮和筋条铺层分别为 $[0/90]_{25}$ 和 $[0/90]_{45}$,其中 0° 方向沿结构的宽度方向。根据以上参数建立了如图 2 所示的有限元模型。

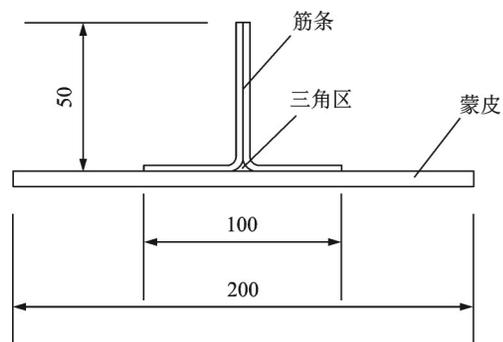


图 1 结构剖面示意图

Fig.1 Schematic diagram of structural section

表 1 复合材料 T700/RTM3312A 力学性能

Table 1 Mechanical properties of composite T700/RTM3312A

| E_1/GPa | $E_2(E_3)/\text{GPa}$ | $G_{12}(G_{13})/\text{GPa}$ | G_{23}/GPa | $\nu_{12}(\nu_{13})$ | ν_{23} |
|------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|------------|
| 121 | 9.23 | 4.62 | 3.38 | 0.34 | 0.46 |

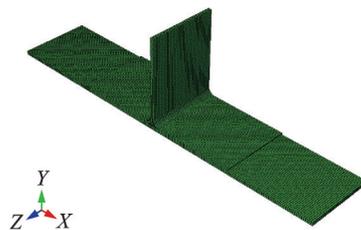


图 2 未缝合 T 形连接件的有限元模型

Fig.2 Finite element model of unstitched T-joint

模型中蒙皮和筋条使用 C3D8R 单元模拟;三角区由 C3D6 单元模拟。在三角区、蒙皮和筋条这三者之间的界面均可能因脱粘而产生分层,因此在这些界面上插入一层无厚度的 Cohesive 单元模拟界面分层失效,Cohesive 单元的参数见表 2。

1.2 有限元结果对比分析

对于未缝合 T 形连接件有限元模型,其失效模式如图 3 所示,主要为三角区及其附近的界面脱粘失效。在位移加载到 3 mm 之前,载荷-位移曲线呈良

表2 Cohesive单元参数

Table 2 Parameters of Cohesive element

| $K/(N \cdot m^{-3})$ | τ_n/MPa | $\tau_s(\tau_r)/MPa$ | $G_{Ic}/(J \cdot m^{-2})$ | $G_{IIc}(G_{IIIc})/(J \cdot m^{-2})$ |
|----------------------|--------------|----------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| 5×10^8 | 20.1 | 28.4 | 507 | 1 034 |

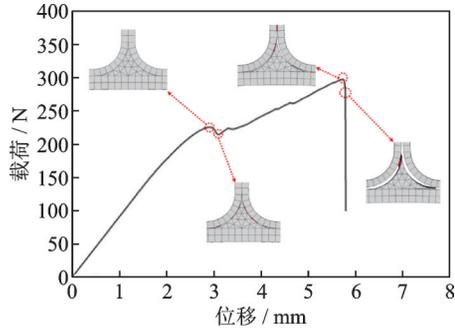


图3 未缝合T形连接件的载荷-位移曲线及三角区界面损伤示意图

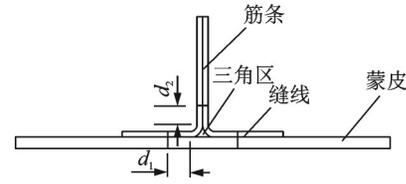
Fig.3 Load-displacement curve and triangular interface damage diagram of unstitched T-joint

好的线性,随着继续加载,由于三角区和筋条间因承受拉伸和剪切而发生界面破坏,出现第一次掉载。此时整体结构刚度较之前明显下降,曲线斜率减小,同时伴随着界面损伤,其载荷-位移曲线出现多次细微掉载。直至加载到5.8 mm左右,界面损伤已经扩展至筋条之间,并进一步向筋条和蒙皮连接的底部扩展,从而导致达到极限载荷11.8 kN之后,载荷大幅下降且结构失去承载能力。整个有限元失效过程和最终失效模式与文献[12]中实际试验失效过程基本吻合,且与试验极限载荷11.0 kN仅相差7.27%,此误差产生的原因可能是由于试验件存在初始缺陷和制造误差,而此模型中代入的参数为理论数据。以上论述从两个方面共同验证了本文所建立的T形连接件有限元模型的可行性和有效性。

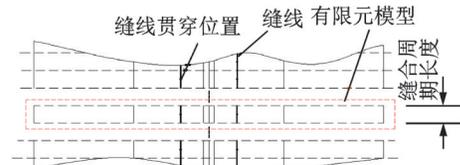
2 缝合T形连接件模型的周期性简化

在第一节研究的基础上沿结构宽度方向添加实体缝线建立了缝合T形连接件有限元模型,利用缝合T形连接件的平移对称性推导出结构两侧截面上的边界条件,进而简化了三维有限元模型。添加实体缝线的方法和过程参考文献[13],仿真数据和实验数据拟合良好,同时这种细观的建模方法在对模型进行二维简化的过程中被广泛应用,因此加入缝线的T形连接件模型仍具备有效性。图4为缝合T形连接件的示意图,其中缝合的位置分两类,一类是筋条和蒙皮的缝合,缝线位置用 d_1 表示;另一类是筋条上的缝合,缝线位置用 d_2 表示。有限元模型的缝合部位如图5所示,缝合方式为锁

式缝合,即同一位置的贯穿厚度方向的缝线为两根。所有模型的宽度和缝线在宽度方向的缝合密度一致。同时,为保证结构对称承载,筋条和蒙皮使用两排缝线缝合,筋条上的缝合只使用一排缝线。缝线均使用C3D8R单元模拟,采用最大应力准则作为失效判据。缝线的材料参数见表3。



(a) Schematic diagram of stitching position of stitched T-joints



(b) Schematic diagram of periodicity of stitched T-joints

图4 缝合T形连接件模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of stitched T-joints

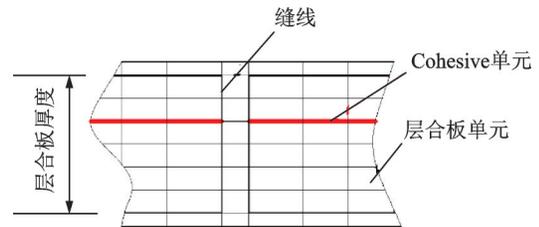


图5 有限元模拟缝合示意图

Fig.5 Schematic diagram of finite element model of stitching thread

表3 缝线的力学性能

Table 3 Mechanical properties of stitching thread

| E_L/GPa | E_T/GPa | G_L/GPa | G_T/GPa | σ_{max}/GPa |
|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|
| 83 | 55 | 2 | 2 | 3.6 |

此缝合结构在宽度方向上具备平移对称性,因此可以对结构进行如图4(b)所示的合理简化。但对具有平移对称性的结构进行简化并不是对结构的简单切割,还需要通过严格的理论推导获得正确的边界条件。本文以Li等[17]的理论为基础,将其中关于通过物质的连续性和结构的平移对称性推导得出的适用于单胞和代表体积单元(Unit cell and representative volume element)的周期性边界条件的方法应用于此,通过此缝合结构的物质连续性和在宽度方向上具备的平移对称性推导出适用于此简化模型的边界条件。

有限元法将连续的物理场离散成一系列具有一定规模的单元且单元之间通过共有的节点连接,这是有限元法的基本前提。物质的连续性同样适

用于有限元法,其连续性可用如图 6 所示的自由体图表示。自由体图假设一个物体被切割成两部分,式(1)和式(2)可由物质的连续性获得。其中坐标系 3 方向为垂直于纸面的面外方向。

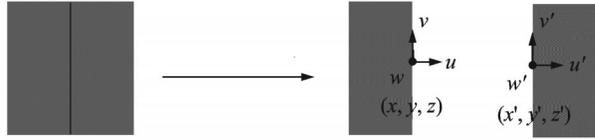


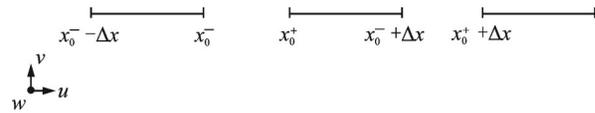
图 6 自由体图示意图

Fig.6 Schematic diagram of free body

$$(x, y, z) = (x', y', z') \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{Bmatrix} \quad (2)$$

如图 7 所示,三维结构在 x 方向上具备平移对称性,并假设其周期为 Δx 。平移对称性使结构的应力场和应变场在 x 方向上具备周期性。由应变的周期性变化可以得出式(3)。当应变场满足平移对称性时,应力场的平移对称性会因有限元中使用的变分原理而自动满足。

图 7 周期为 Δx 的平移对称性示意图Fig.7 Schematic diagram of translational symmetry with period Δx

$$\varepsilon(x) = \varepsilon(x - \Delta x) \quad (3)$$

通过将式(3)在区间 $[x_0, x_0 + \Delta x]$ 内积分,得到

$$u(x_0 + \Delta x) - u(x_0^-) = u(x_0^-) - u(x_0^- - \Delta x) = \varepsilon_0 \Delta x \quad (4)$$

式中 ε_0 为结构在 $[x_0, x_0 + \Delta x]$ 内的平均应变。

根据物质的连续性给出

$$u(x_0^-) = u(x_0^+) \quad (5)$$

联立式(4,5),得到

$$u(x_0 + \Delta x) - u(x_0^+) = \varepsilon_0 \Delta x \quad (6)$$

将式(6)从一维推广到三维可获得

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}_{x_0 + \Delta x} - \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}_{x_0^+} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \Delta x \\ \gamma_{xy0} \Delta x \\ \gamma_{xz0} \Delta x \end{Bmatrix} \quad (7)$$

式中 γ_{xy0} 和 γ_{xz0} 为结构在一个周期内的平均剪切应变。

这些边界条件的实现方法是通过 Abaqus 中的约束方程(Constraint equations)将简化模型两个侧面上的节点关联起来。式(7)中 u 、 v 和 w 为有限元模型两侧截面上单元节点 3 个方向的位移; Δx

为缝合周期长度; ε_0 、 γ_{xy0} 和 γ_{xz0} 为 3 个参考点(RP1、RP2 和 RP3)分别在 X 、 Y 和 Z 方向上的位移量,其值与有限元模型的真实应变值相等。具体途径为使用 python 脚本读取模型两侧截面上的节点编号并组成两个列表,当两个节点之间的 X 坐标和 Y 坐标差小于指定的精度时,代码将识别这两个节点并组成如式(8)所示的约束方程。

$$A \times U_1^{\text{DoF}} + B \times U_2^{\text{DoF}} + C \times U_{\text{RP}(i)}^{\text{DoF}} = 0 \quad (8)$$

式中 U_1^{DoF} 和 U_2^{DoF} (DoF=1,2 或 3) 分别为两侧节点在第 DoF 个自由度上的位移量,即两侧节点的 u 、 v 和 w ; $U_{\text{RP}(i)}^{\text{DoF}}$ 为 RP1、RP2 和 RP3 分别在 X 、 Y 和 Z 方向上的位移量,即 ε_0 、 γ_{xy0} 和 γ_{xz0} ;其各项系数如表 4 所示。简化后的有限元模型如图 8 所示。

表 4 约束方程参数

Table 4 Parameters of constraint equations

| DoF | A | B | C | RP(i) |
|-----|---|----|-----|-------|
| 1 | 1 | -1 | -10 | 1 |
| 2 | 1 | -1 | -10 | 2 |
| 3 | 1 | -1 | -10 | 3 |

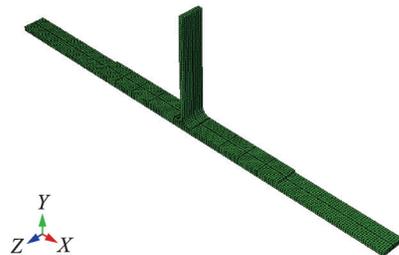


图 8 缝合 T 形连接件的简化有限元模型

Fig.8 Simplified finite element model of stitched T-joint

3 缝合参数研究

3.1 蒙皮和筋条的缝合

本文通过改变 T 形连接件缝线的位置和横截面积来研究缝线对拉脱承载能力的增强机理,研究了结构所能承受的极限载荷、失效模式以及最终破坏时的加载端位移等。对于蒙皮和筋条的缝合,缝合位置用 d_1 表示,如图 4(a)所示,包括 0、5、10、15、20、25、30、35 和 40 mm 共 9 种。缝线尺寸包括 200D(横截面积为 0.0142 mm^2)、400D(横截面积为 0.0283 mm^2) 和 600D(横截面积为 0.0425 mm^2) 3 种。所有模型的缝合周期长度为 10 mm,故有限元模型的宽度为 10 mm。

蒙皮和筋条缝合的 T 形连接件在拉脱载荷下的载荷-位移曲线如图 9 所示。3 种横截缝线面积下,不同缝合位置 T 形连接件第二次掉载前与未缝合 T 形连接件规律一致,都是由于三角区和筋条间的界面发生损伤从而导致掉载和刚度衰减。对于缝线位于三角区边缘($d_1=0 \text{ mm}$)的 T 形连接

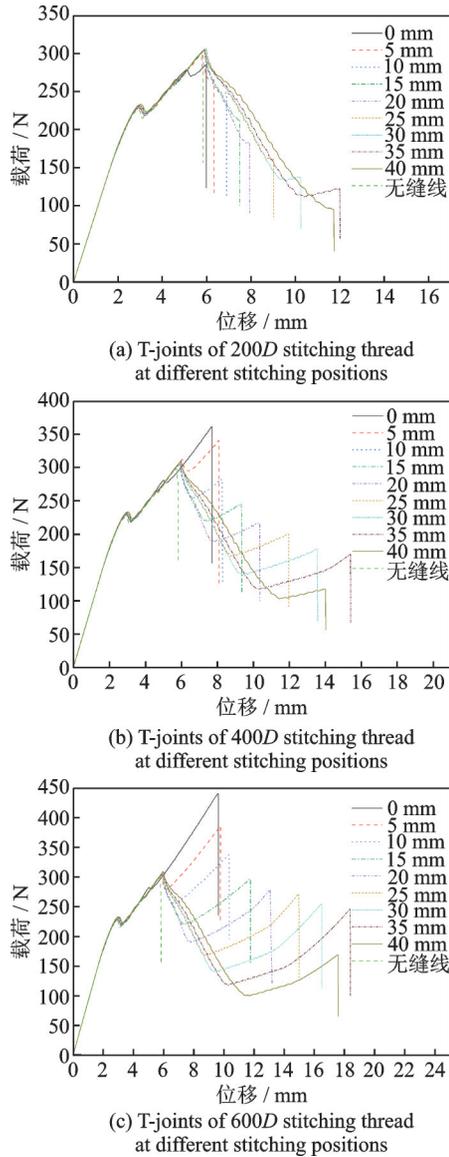


图9 蒙皮和筋条缝合的T形连接件在拉脱载荷下的载荷-位移曲线

Fig.9 Load-displacement curves of T-joints stitched with skin and ribs under pull-out load

件,第二次掉载会较先发生且此时的载荷较低。这是由于三角区边缘为了插入的缝线而开的孔会使复合材料层合板产生自由边,而对于复合材料层合板来说,由于每层的铺层方向不同,层合板自由边的层间会产生应力集中从而导致缝线贯穿位置附近筋条和蒙皮的界面提前产生损伤。除此之外,其他结构第二次失效掉载时的位移和载荷差别不大。此类缝合结构在第二次掉载后还能由缝线继续承载,最终由于如图10所示的缝线断裂,结构迅速掉载并失去承载能力。

图11(a)给出了缝线位置和横截面积对应的最大载荷的示意图。可以明显看出,缝合位置越靠近三角区,缝线对结构最大载荷的影响越大。对于缝线截面积为200D的模型,当 d_1 为0 mm时,其极限载荷全由缝线的断裂决定,相比未缝合模型减小

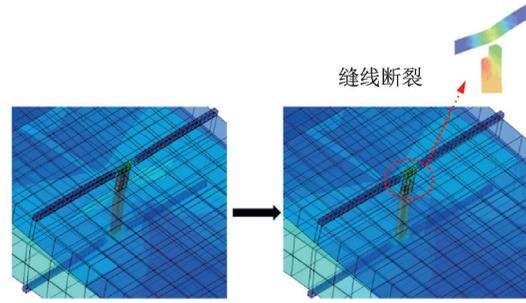


图10 有限元模拟的缝线断裂过程

Fig.10 Stitching thread fracture process simulated by finite element method

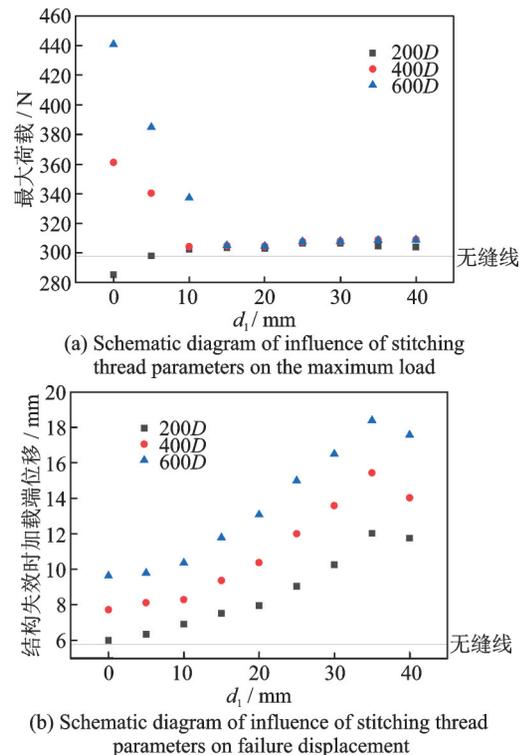


图11 缝线位置和横截面积对蒙皮和筋条缝合的T形连接件力学性能的影响示意图

Fig.11 Schematic diagram of influence of position of the stitching thread and the cross-sectional area on mechanical properties of T-joints of the stitched skin and stiffener

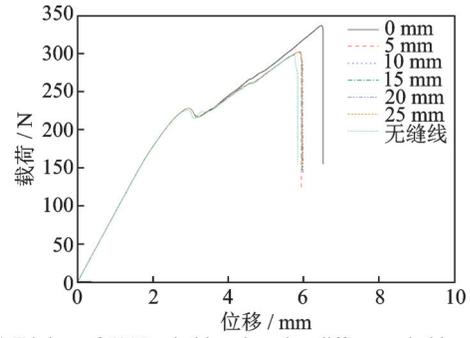
了4.2%;当 d_1 大于5 mm时,其极限载荷全由蒙皮和筋条间的界面脱粘决定,其极限载荷相比未缝合模型提高1.5%~3%。对于缝线截面积为400D的模型,当 d_1 小于10 mm时,其极限载荷由缝线的断裂决定,极限载荷相比未缝合模型最大可提升21.2%;当 d_1 大于等于10 mm之后,其极限承载能力又由蒙皮和筋条间的界面脱粘决定。对于缝线截面积为600D的模型,当 d_1 小于15 mm时,其极限载荷由缝线的断裂决定,极限载荷相比未缝合模型最大可提升48.0%;当 d_1 大于等于15 mm之后,其极限载荷由蒙皮和筋条间的界面脱粘决定。图11(b)给出了缝线位置和横截面积对应的结构整体

破坏时加载端位移的统计图。对于横截面积不同的缝线,其结构整体破坏时加载端的位移随 d_1 的变化规律一致,都是随着 d_1 的增加而增加,并在缝线接近筋条边缘时发生小幅减小,结构完全破坏时的载荷也会降低。同时可以看出,缝线越粗,结构整体破坏时加载端的位移越大。

3.2 筋条上的缝合

本文还研究了筋条上的缝合对 T 形连接件力学性能的影响,筋条上的缝合位置用 d_2 表示,如图 4(a) 所示,包括 0、5、10、15、20 和 25 mm 共 6 种。缝线尺寸包括 200D(横截面积为 0.0142 mm^2)、400D(横截面积为 0.0283 mm^2) 和 600D(横截面积为 0.0425 mm^2) 3 种,且缝线在宽度方向的密度为 10 mm。研究内容同样包括了结构所能承受的极限载荷、失效模式以及最终破坏时的加载端位移等。

筋条上的缝合则与筋条和蒙皮之间的缝合有着不同的特点。图 12 给出了缝线的不同位置和横截面积在拉脱载荷下的载荷-位移曲线。对于缝线位于三角区边缘($d_2=0 \text{ mm}$)的结构,缝线会小幅提高结构在其载荷-位移曲线第一次掉载后的刚度,还会提升结构的极限载荷和破坏位移。这是由于缝线可以抑制两根筋条间界面损伤的扩展,从而延迟界面损伤扩展至筋条和蒙皮连接的底部,最终可以在一定程度上提高结构的极限载荷和破坏位移。正是因为此处缝线只能延迟界面损伤的扩展而不能起到承载传力的作用,所以本小节的所有缝合 T 形连接件的极限载荷相比于未缝合结构最大



(c) T-joints of 600D stitching thread at different stitching positions
图 12 筋条缝合的 T 形连接件在拉脱载荷下的载荷-位移曲线

Fig.12 Load-displacement curves of T-joints with stitched ribs under pull-out load

只增加了 13.1%。当 d_2 为 5 mm 或更大时,缝合对 T 形连接件承载能力基本无影响。当缝线离三角区越远且缝线越粗时,缝线越不容易在结构承载时发生断裂;并且在第一次掉载之后,无论缝线是否发生断裂,结构最终的失效都是由筋条和蒙皮之间的界面损伤决定。

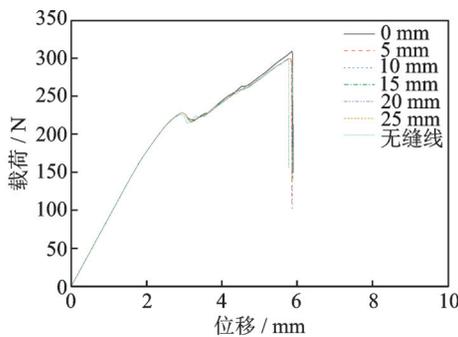
4 结 论

本文基于物质的连续性和缝合 T 形连接件在宽度方向上的平移对称性建立了一种简化模型,在保证计算精度的同时提高了计算速度。在此基础上研究了缝合位置和横截面积对 T 形连接件在拉脱载荷下力学性能的影响。研究结论如下:

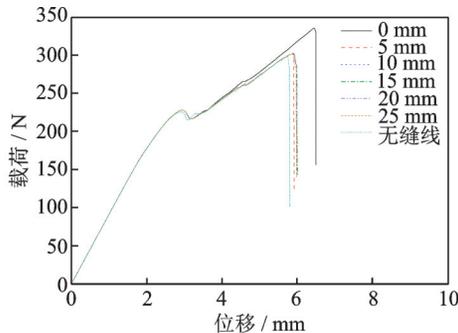
(1) 对于连接蒙皮和筋条的缝线,其位置越靠近三角区,缝线对结构最大承载能力的影响越大。在三角区边缘加入过细的缝线会小幅降低结构承载能力。在缝线离三角区较远时,缝线不能增加最大载荷但可以使结构在最大载荷后仍能有部分承载能力。缝线越粗,结构整体破坏时加载端的位移越大且载荷也越大。在缝线离三角区较近时结构的极限载荷由缝线的断裂决定、较远时由蒙皮和筋条间的界面脱粘决定。

(2) 对于筋条上的缝合,只有三角区边缘的缝线会小幅增加 T 形连接件在拉脱载荷下的刚度和强度。结构的极限载荷最终由蒙皮和筋条间的界面脱粘决定。

(3) 仿真结果表明:在对 T 形连接件进行缝合增强设计时,缝合位置应尽量靠近三角区,且连接两根筋条的缝线只有在三角区边缘时才会提升承载能力。同时,任何缝线应在不会大幅影响层合板性能的情况下应尽可能粗,从而达到对结构增强的同时不会大幅增加结构重量的目的。



(a) T-joints of 200D stitching thread at different stitching positions



(b) T-joints of 400D stitching thread at different stitching positions

参考文献:

- [1] SONG C Y, FAN W, LIU T, et al. A review on three-dimensional stitched composites and their research perspectives[J]. *Composites Part A*, 2022, 153: 106730.
- [2] MOURITZ A P, LEONG K H, HERSZBERG I. A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites [J]. *Composites Part A*, 1997, 28(12): 979-991.
- [3] SABOKTAKIN A, KALAOGLU F, SHAHROOZ M, et al. Failure analysis of 3D stitched composite using multi-scale approach for aerospace structures[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2021, 113(5): 943-951.
- [4] 董孚允, 王春敏, 董娟. 三维纺织复合材料的发展和应用[J]. *纤维复合材料*, 2001, 18(3): 37-40.
DONG Fuyun, WANG Chunmin, DONG Juan. Development and application of 3D textile composites [J]. *Fiber Composite*, 2001, 18(3): 37-40.
- [5] DRANSFIELD K, BAILLIE C, MAI Y W. Improving the delamination resistance of CFRP by stitching—A review[J]. *Composites Science & Technology*, 1994, 50(3): 305-317.
- [6] 郭勇, 钱坤, 蒋云. 缝合复合材料的制备与力学性能分析[J]. *塑料*, 2019, 48(5): 114-118.
GUO Yong, QIAN Kun, JIANG Yun. Preparation and mechanical properties of stitched composite[J]. *Plastics*, 2019, 48(5): 114-118.
- [7] KHAN M Z S, MOURITZ A P. Fatigue behaviour of stitched GRP laminates[J]. *Composites Science & Technology*, 1996, 56(6): 695-701.
- [8] ZHAO N, RDEL H, HERZBERG C, et al. Stitched glass/PP composite. Part I: Tensile and impact properties[J]. *Composites Part A*, 2009, 40(5): 635-643.
- [9] YUDHANTO A, WATANABE N, IWAHORI Y, et al. Effect of stitch density on tensile properties and damage mechanisms of stitched carbon/epoxy composites[J]. *Composites Part B*, 2013, 46: 151-165.
- [10] YAAKOB M Y, HUSIN M A, ABDULLAH A, et al. Effect of stitching patterns on tensile strength of Kenaf woven fabric composites[J]. *International Journal of Integrated Engineering*, 2019. DOI:10.30880/ijie.2019.11.06.008.
- [11] ARBAOUI J, TARFAOUI M, BOUERY C, et al. Comparative study of mechanical properties and damage kinetics of two- and three-dimensional woven composites under high strain rate dynamic compressive loading[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2016, 25(6): 878-899.
- [12] 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.
- [13] 燕瑛, 韩凤宇, 杨东升, 等. 缝合复合材料弹性性能的三维有限元细观分析与试验验证[J]. *航空学报*, 2004, 25(3): 267-269.
YAN Ying, HAN Fengyu, YANG Dongsheng, et al. Three dimensional finite element meso analysis and experimental verification of elastic properties of stitched composites[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2004, 25(3): 267-269.
- [14] 叶强. 层合复合材料的粘聚区模型及其应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
YE Qiang. Study on the cohesive zone model of laminated composites and its application[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [15] 文立伟, 余坤, 宦华松. 缝合复合材料T形接头拉伸载荷下的有限元数值模拟[J]. *航空学报*, 2021, 42(2): 142-149.
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): 142-149.
- [16] 李梦佳, 陈普会, 孔斌, 等. 缝合参数对复合材料T形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. Effect of stitching parameters on pull-out load-carrying capacity of composite T-joints[J]. *Journal of Composite Materials*, 2016, 33(3): 681-688.
- [17] LI S, SITNIKOVA E. Representative volume elements and unit cells—Concepts, theory, applications and implementation[M]. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2019.

(编辑: 胥橙庭)