

T 型接头蒙皮厚度对 Z-pin 增强效果的影响

李梦佳¹, 陈普会^{1,*}, 孔斌², 彭涛², 姚正兰², 邱学仕²

(1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016; 2. 成都飞机设计研究所, 成都 610091)

摘 要: 在关于拉脱载荷下 Z-pin 增强 T 型接头的有限元模拟方法基础上, 通过对 2 组蒙皮厚度分别为 7.2 mm 和 4.0 mm 的试验件的试验结果进行分析, 研究了 T 型接头蒙皮厚度对 Z-pin 增强效果的影响。结果表明: Z-pin 增强效果随着蒙皮厚度的减小而增大。蒙皮厚度大于 5 mm, Z-pin 不能提高结构的最大承载能力, 但可显著提高结构首次掉载后的承载性能, 使 T 型接头在较大的加载位移下仍保持较高的承载能力; 无论蒙皮厚薄, 结构首次掉载后, 各 Z-pin 增强 T 型接头可达到的载荷平台是相当的, 且该载荷平台随蒙皮的变厚有降低的趋势。

关键词: 复合材料; T 型接头; Z-pin; 蒙皮厚度; 有限元模拟

中图分类号: V214.8; TB332

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2016)07-1461-07

复合材料结构整体化设计技术是实现结构低成本、高性能的有效途径。T 型接头就是一种应用于现代飞机结构的典型复合材料整体化结构形式。由于纤维与树脂性能的不匹配, 层合板的层间性能较差。蒙皮与缘条之间的脱胶是 T 型接头的典型失效模式。通过 Z-pin 等增强技术能够显著提高蒙皮与缘条的界面性能^[1-3]。

Z-pin 的增强效果受很多因素的影响, 如 Z-pin 的体积分数、Z-pin 的直径和 Z-pin 的植入角度等。由于 Z-pin 的桥联力与 Z-pin 与层合板之间的接触面积成正比^[4], Z-pin 的体积分数和 Z-pin 的直径越大, Z-pin 的增强效果越好。Park 等^[5]的研究表明, 同样的 Z-pin 体积分数下, 小直径的 Z-pin 较大直径的 Z-pin 可提供更大的桥联力。叶强^[6]采用细观力学方法研究了不同植入角度的 Z-pin 的桥联律, 笔者^[7]结合该细观力学方法研究了不同植入角度对 Z-pin 增强 T 型接头拉脱承载能力的影响。结果表明, 植入角度越小, Z-pin 的增强效果越好。

此外, Z-pin 的植入深度也是影响 Z-pin 增强效果的重要因素。Pegorin 等^[8]的研究表明, Z-pin 越长, 层合板的 I 型断裂韧性及疲劳性能越好。Koh 等^[9]通过试验研究了缘条蒙皮厚度对缘条与蒙皮厚度相同的 Z-pin 增强 T 型接头的拉脱性能的影响。

结果表明, 厚度越大(植入越深), T 型接头的性能越好。Koh 等^[9]的研究对象为缘条与蒙皮厚度相同的 T 型接头, 而在实际工程应用中, T 型接头缘条的厚度往往小于蒙皮的厚度, 研究缘条厚度或蒙皮厚度(而非缘条和蒙皮的总厚度)对 Z-pin 增强效果的影响是非常有意义的。由于 Z-pin 的桥联力与 Z-pin 和层合板之间的接触面积成正比, 而缘条厚度又小于蒙皮厚度, 显然 Z-pin 的增强效果随着缘条厚度的变厚而增大。薄蒙皮 T 型接头和厚蒙皮 T 型接头在现代飞行器中应用都很广泛, 研究蒙皮厚度对 Z-pin 增强效果的影响是非常有意义的, 而在该领域目前还鲜有人涉及。

本文在之前工作的基础上^[7], 通过对 2 组缘条厚度相近、蒙皮厚度差别较大的 Z-pin 增强 T 型接头试验结果的对比分析, 采用有限元方法对蒙皮厚度进行参数化分析, 以明晰蒙皮厚度对 Z-pin 增强效果的影响, 对 Z-pin 增强 T 型接头的设计具有一定的指导意义。

1 试验对象及试验方法

为了研究蒙皮厚度对 Z-pin 增强效果的影响, 选取 2 种构型(构型 1[#]和构型 2[#])的 Z-pin 增强 T 型接头。T 型接头试验件的几何构型如图 1 所示。

收稿日期: 2015-06-17; 录用日期: 2015-08-23; 网络出版时间: 2015-09-30 11:50

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20150930.1150.004.html

基金项目: 国家自然科学基金(11572152); 江苏高校优势学科建设工程基金

通讯作者: 陈普会, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料结构设计。 E-mail: phchen@nuaa.edu.cn

引用格式: 李梦佳, 陈普会, 孔斌, 等. T 型接头蒙皮厚度对 Z-pin 增强效果的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(7): 1461-1467.

LI M J, CHEN P H, KONG B, et al. Influence of skin thickness of T-joint on reinforcing effect of Z-pin[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(7): 1461-1467 (in Chinese).

模型结构由子层 1[#]、子层 2[#]、子层 3[#] 及填充区填充物等组成。结构关于接头立筋轴线对称，子层 2[#] 和子层 3[#] 也关于立筋轴线对称。子层 1[#] 的铺层坐标系如图 1 中俯视图所示；子层 2[#] 和子层 3[#] 的铺层坐标系如图 1 中右视图所示。构型 1[#] 和构型 2[#] 试验件的根部圆角半径 R 均为 5 mm，宽度 W 分别为 60 mm 和 50 mm；缘条宽度 F 分别为 25 mm 和 30 mm。2 种构型 T 型接头的铺层顺序如表 1 所示，除蒙皮厚度外，几何构型基本一致。

2 组试件均取自于工程研发项目的系列试验件，由于这 2 组试件除了蒙皮厚度差别较大外，其余结构参数差别较小，故选取这 2 组试验分析蒙皮厚度的影响，其几何尺寸的差异源于工程设计项目的试验件规划。2 组试件的铺层顺序及比例是按设计手册与工程经验选定的。此外，2 组试验件的铺层顺序及铺层比例（铺层 $\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ$ ，比例分别为 40%、50%、10%，44.44%、44.44%、11.12%）非常类似，由于厚度不同，铺层比例的些许差别是不可避免的。

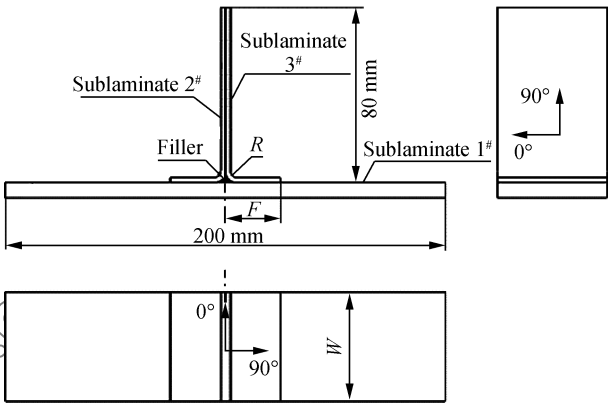


图 1 T 型接头试验件的几何构型
Fig. 1 Geometrical configuration of T-joint specimen

结构采用 T700/QY8911-IV 复合材料，单层名义厚度为 0.2 mm。填充区填充物的材料也为 T700/QY8911-IV 复合材料，纤维方向与 T 型结构宽度方向（即 0° 方向）平行。T700/QY8911-IV 复合材料的力学性能如表 2 所示。

表 1 2 种构型 T 型接头的铺层顺序

Table 1 Stacking sequences of two kinds of configuration T-joints

Configuration number	Number of sublamine	Stacking sequence	Number of plies
1 [#]	1 [#]	$[45/0/-45/90/0/45/0/-45/0/45/0/-45/90/0/45/0/-45/0]_s$	36
	2 [#] and 3 [#]	$[45/-45/0/45/-45/90/45/-45/0]_s$	18
2 [#]	1 [#]	$[45/0/-45/0/90/0/45/0/-45/0]_s$	20
	2 [#] and 3 [#]	$[45/-45/0/45/-45/90/45/-45]_s$	16

表 2 T700/QY8911-IV 复合材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of T700/QY8911-IV composites

Parameter	E_{11} /GPa	E_{22} /GPa	ν_{12}	G_{12} /GPa
Value	121	9.93	0.321	5.75

Notes: E_{11} and E_{22} —Elastic modulus; ν_{12} —Poisson's ratio; G_{12} —Shear modulus.

Z-pin 的参数定义如图 2 所示，其中最内侧 Z-pin 距离立筋轴线的距离为 D ；Z-pin 的列距为 S ，列数为 N ，行距为 L ，行数为 M 。Z-pin 材料为 T300/NHZIP-1 复合材料，其中 T300 为纤维束材料，NHZIP-1 是南京航空航天大学自行研发的 Z-pin 双马树脂^[10]，Z-pin 的力学性能如表 3 所示。2 种构型 T 型接头的 Z-pin 参数如表 4 所示，Z-pin 的直径为 0.5 mm。

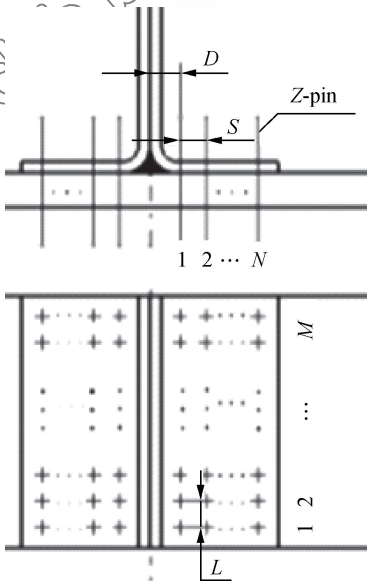


图 2 Z-pin 的参数定义
Fig. 2 Parameter definitions of Z-pin

试验研究在中国飞机强度研究所进行。构型 1[#] 的 T 型拉脱试验的加载方式如图 3(a) 所示, 试验件为简支支持, 构型 2[#] 的 T 型拉脱试验的加载方式如图 3(b) 所示, 试验件为固支支持, 两端夹具各夹持 50 mm, 在立筋上施加位移载荷。

表 3 Z-pin 的力学性能

Table 3 Mechanical properties of Z-pin		
Parameter	Tensile strength/GPa	Tensile modulus/GPa
Value	3.54	231

表 4 2 种构型 T 型接头的 Z-pin 参数

Table 4 Z-pin parameters of two kinds of configuration T-joints				
Configuration number	Parameter			
	D/mm	L/mm	S/mm	N
1 [#]	5	5	4	4
2 [#]	7	3	3	7

Notes: D — Distance between innermost Z-pin and axis of web; L — Row spacing; S — Column spacing; N — Number of columns.

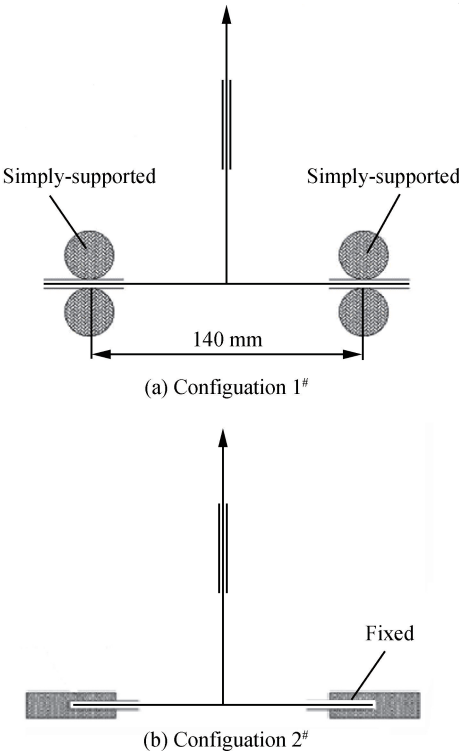


图 3 构型 1[#] 和构型 2[#] 的 T 型拉脱试验的加载方式
Fig. 3 Loading methods of T-joint pull-off tests of configuration 1[#] and configuration 2[#]

2 有限元方法与参数化分析

2.1 有限元方法及其试验验证

由于试验件在拉脱载荷下的破坏模式主要为 I 型与 II 型的混合模式, III 型所占比例很小, 同时 W 向同一列的 Z-pin 几乎是同时被拉脱的, 为了便于参数化分析, 在采用已在工程中被广泛应用和验证的复合材料层压板三维有效弹性模量理论^[11-14] 对层压板的三维弹性性能进行等效后, 运用 ABAQUS 商用有限元软件建立二维平面应变模型模拟试验。T 型拉脱试验的二维有限元模型如图 4 所示, 根据夹具夹持位置, 将立筋高度取为 45 mm, 通过约束蒙皮端部总体坐标下 y 方向的位移来建立简支边界条件模拟试验的简支边界; 通过约束蒙皮端部总体坐标下 x、y 方向的位移及 x-y 面内的转动来建立固支边界条件模拟试验的固支边界, 在立筋端部施加位移载荷。

采用与内聚单元类似的黏性行为模拟界面的脱胶, 黏性行为是 ABAQUS 自带的一种接触定义, 不需要用户建立界面单元, 其原理及各参数的定义与内聚单元(黏接元)是相似的。黏性行为参数定义如表 5 所示。在填充区与蒙皮界面、填充区与缘条界面、缘条与蒙皮界面以及两侧腹板间的界面上均可能发生破坏, 因此在这些界面位置均设置黏性行为, 黏性行为定义如图 5 所示。

有限元模拟 Z-pin 时, 在 Z-pin 中心线位置的上下界面的相应上下节点处加 2 对非线性弹簧, 其中 x 方向的弹簧模拟 Z-pin 抑制界面剪开的桥联作用, y 方向的弹簧用于模拟 Z-pin 抑制界面张开的桥联作用。非线性弹簧的力学性能通过细观力学方法^[6] 计算得到。在三维向二维转换时, 对 W 方向的 Z-pin 进行均匀化处理, 桥联力等于单根 Z-pin 提供的桥联力乘以 W 方向的 Z-pin 根数再除以 W。前期工作^[7] 已对该细观力学方法计算 Z-pin 桥联力的可靠性进行验证, 在此不再赘述。

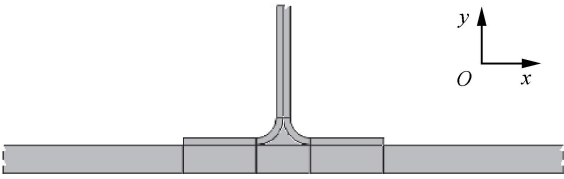


图 4 T 型拉脱试验的二维有限元模型
Fig. 4 2D finite element model of T-joint pull-off test

表 5 黏性行为参数定义

Table 5 Parameter definitions of cohesive behavior

Parameter	Modulus/GPa			Strength/MPa			Energy release rate/(N·mm ⁻¹)		
	K_{nn}	K_{ss}	K_{tt}	N	S_1	S_2	G_{IC}	G_{IIC}	G_{IIIC}
Value	1 000	1 000	1 000	8.6	22.1	22.1	0.3	0.665	0.665

Notes: K_{nn} — Normal stiffness of interface; K_{ss} , K_{tt} — Shear stiffness of interface; N — Normal strength; S — Shear strength; G_{IC} — Normal fracture energy; G_{IIC} , G_{IIIC} — Shear fracture energy.

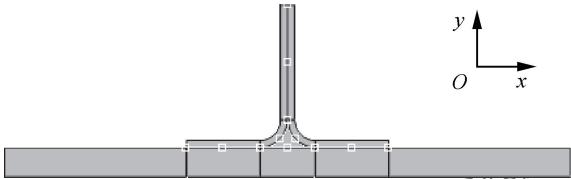


图 5 黏性行为定义
Fig. 5 Definition of cohesive behavior

图 6 为细观力学方法预测的直径 $\Phi=0.5\text{ mm}$ 的单根 T300/NH3P1 Z-pin 的桥联律。界面完全脱胶后, Z-pin 桥联力达到最大值, 继而 Z-pin 被缓慢拔出, 桥联力逐渐减为 0。

根据试验建立构型 1[#] T 型接头的有限元模型进行分析, 简支条件下 Z-pin 增强前后构型 1[#] T 型接头试样的 FEM 预测载荷-位移曲线及与试验的比较如图 7 所示。FEM 预测得到的简支条件下 Z-pin 增强前后构型 1[#] T 型接头试样的破坏载荷与试验结果的比较如表 6 所示。Z-pin 增强不仅能提高结构的最大承载能力, 同时也使 T 型接头在较大的加载位移下仍保持较高的承载性能。而未增强 T 型接头在达到最大承载能力后迅速掉载, 承载性能较差。Z-pin 增强 T 型接头的有限元结果和试验结果吻合良好, 可见所采取的有限元方法是可靠的。

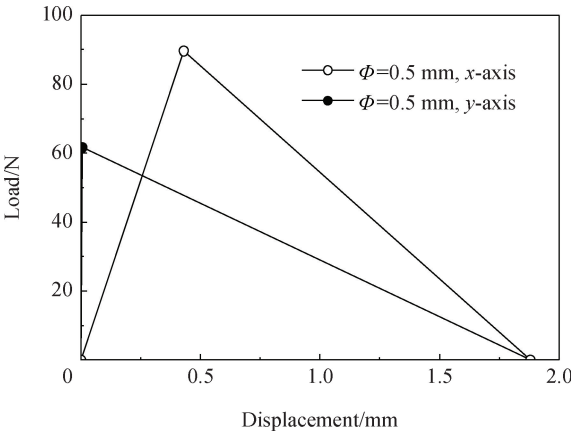


图 6 细观力学方法预测的直径 $\Phi=0.5\text{ mm}$ 的单根 T300/NH3P1 Z-pin 的桥联律
Fig. 6 Bridging laws of single T300/NH3P1 Z-pin with diameter $\Phi=0.5\text{ mm}$ predicted by micromechanics method

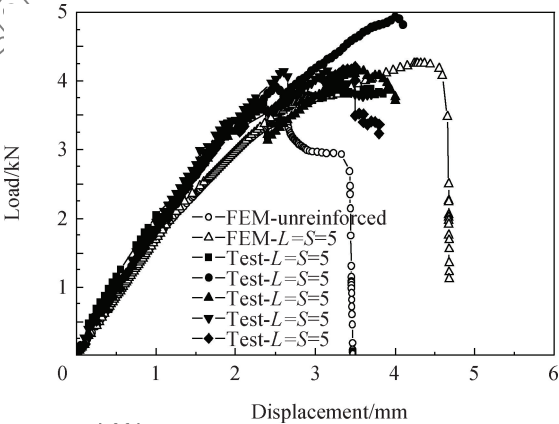


图 7 简支条件下 Z-pin 增强前后构型 1[#] T 型接头试样的 FEM 预测载荷-位移曲线及与试验的比较
Fig. 7 Load-displacement curves predicted by FEM and comparison with test of configuration 1[#] T-joints specimen before and after Z-pin reinforcement under simply-supported condition

表 6 FEM 预测得到的简支条件下 Z-pin 增强前后构型 1[#] T 型接头试样的破坏载荷与试验结果的比较

Table 6 Comparisons of failure loads predicted by FEM and test results of configuration 1[#] T-joints specimen before and after Z-pin reinforcement under simply-supported condition

Loading method	Configuration number	Z-pin scheme	Failure load/kN	
			Predicted	Test
Simply supported	1 [#]	Unreinforced	3.42	3.40
		$L=S=5$	4.25	4.23

同样地, 根据试验建立构型 2[#] T 型接头的有限元模型进行分析, 固支条件下 Z-pin 增强前后构型 2[#] T 型接头试样的 FEM 预测载荷-位移曲线见图 8, FEM 预测得到的固支条件下 Z-pin 增强前后构型 2[#] T 型接头试样的破坏载荷与试验结果的比较见表 7, 有限元结果与试验吻合良好。T 型接头在拉伸载荷作用下, 界面分层损伤首先出现在缘条与填充区的界面, 随后向缘条与蒙皮之间的界面扩展, 最终破坏时缘条与蒙皮分离, Z-pin 被拔起, 立筋相互分离, Z-pin 不会改变结构的破坏模式, 有限元预测的失效机制与试验观察基本一致^[7]。

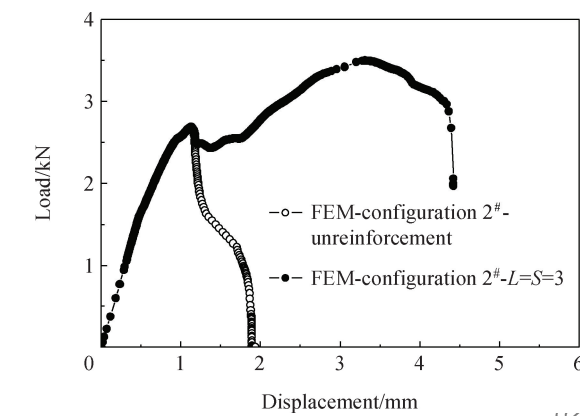


图 8 固支条件下 Z-pin 增强前后构型 2[#] T 型接头试样的 FEM 预测载荷-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of configuration 2[#] T-joints specimen predicted by FEM before and after Z-pin reinforcement under fixed-supported condition

表 7 FEM 预测得到的固支条件下 Z-pin 增强前后构型 2[#] T 型接头试样的破坏载荷与试验结果的比较

Table 7 Comparisons of failure loads predicted by FEM and test results of configuration 2[#] T-joints specimen before and after Z-pin reinforcement under fixed-supported condition

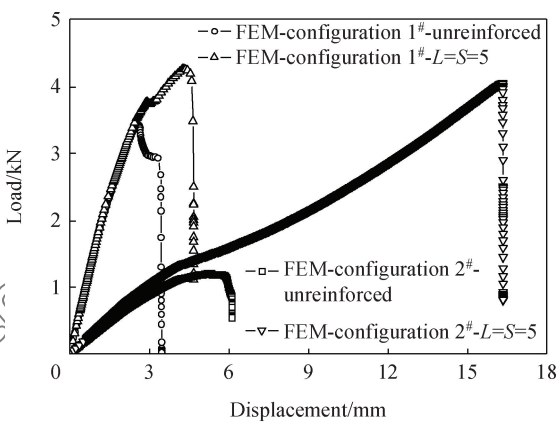
Loading method	Configuration number	Z-pin scheme	Failure load/kN	
			Predicted	Test
Fixed-supported	2 [#]	Unreinforced	2.67	2.53
		L=S=3	3.72	3.67

2.2 蒙皮厚度影响的初步分析

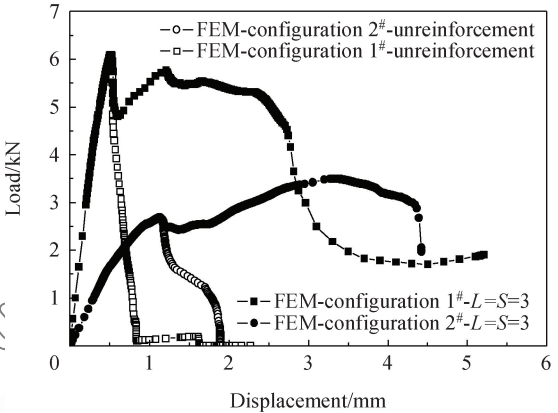
为了研究蒙皮厚度的影响, 根据构型 1[#] 试验件的 Z-pin 布局, 对构型 2[#] 采用相同的 Z-pin 布局和简支加载方式进行有限元分析。简支条件下 Z-pin 增强前后 2 种构型 T 型接头试样的 FEM 预测载荷-位移曲线的比较如图 9(a) 所示。

对比有限元结果, 蒙皮较厚的构型 1[#] 的刚度较大, 未增强 T 型接头的承载能力较高, Z-pin 虽可明显提高 T 型接头的承载性能, 但增强效果与蒙皮较薄的构型 2[#] 相比是非常不理想的, 可见蒙皮厚度对 Z-pin 的增强效果影响较大。

同样, 根据构型 2[#] 试验件的 Z-pin 布局, 对构型 1[#] 采用相同的 Z-pin 布局和固支加载方式进行有限元分析, 分析结果见图 9(b)。蒙皮较厚的构型 1[#] 由于本身结构刚度较构型 2[#] 大, 且固支的边界条件提供了比简支边界更大的支持刚度, 未增强的 T 型接头的支持刚度已很高, Z-pin 不能提高其最大承载能力, 但可提高其在首次掉载后的承载性



(a) Simply-supported condition



(b) Fixed-supported condition

图 9 简支及固支条件下 Z-pin 增强前后 2 种构型 T 型接头试样的 FEM 预测载荷-位移曲线的比较

Fig. 9 Comparisons of load-displacement curves of two kinds of configuration T-joints specimen predicted by FEM before and after Z-pin reinforcement under simply-supported condition and fixed supported condition

能。通过比较图 9(a) 和图 9(b), 可见不仅蒙皮厚度对 Z-pin 的增强效果有很大影响, 边界条件对 Z-pin 增强效果的影响也很明显, Z-pin 在简支边界条件下的增强效果较固支边界时要好。

2.3 蒙皮厚度对 Z-pin 增强效果影响的参数化分析

以构型 2[#] 试验件为基准件, 采用固支加载条件, 保持结构各参数和 Z-pin 参数不变, 对蒙皮厚度进行参数化, 分别建立蒙皮厚度为 2、4、5、6、8、10 mm 的有限元模型进行分析, 以研究蒙皮厚度对 Z-pin 增强效果的影响。厚度变化, 保持铺层比例不变, 只改变层数或单层厚度, 基于复合材料层压板三维有效弹性模量理论^[11] 的层压板的三维刚度矩阵是相同的。

Z-pin 增强前后不同蒙皮厚度的 T 型接头的载

荷-位移曲线的比较见图 10。蒙皮厚度越薄, 结构刚度越小, 未增强件承载能力越低, Z-pin 增强效果越好; 蒙皮越厚, 结构刚度越大, 未增强件承载能力越高, Z-pin 增强效果越差。蒙皮厚度大于 5 mm, Z-pin 不能提高结构的最大承载能力, 但可显著提高结构首次掉载后的承载性能, 使 T 型接头在较大的加载位移下仍保持较高的承载能力。

在进行 Z-pin 增强接头的结构设计时, 建议在满足其他设计要求的前提下最大限度地减小蒙皮厚度, 从而降低结构质量, 同时通过 Z-pin 技术提高 T 型接头的最终承载能力。同时, 在完成未增强 T 型接头的设计后, 建议根据已完成的设计确定是否应该布置 Z-pin: 对于厚蒙皮 T 型接头, 布置 Z-pin 可达到的增强效果差, 可选择不布置 Z-pin, 但也可通过布置 Z-pin 提高结构首次掉载后的承载性能; 而对于薄蒙皮 T 型接头, Z-pin 可成倍地提高其承载能力, 建议进行 Z-pin 增强。

无论蒙皮厚薄, 对于 Z-pin 增强件, Z-pin 在结构首次掉载后才发挥作用, 而结构在首次掉载后, T 型接头本身已无承载能力, 整个结构全靠 Z-pin 来承载; 且对各 T 型接头, 由于缘条厚度与各 Z-pin 参数均相同, Z-pin 可提供的桥联力是近似相同的 (不同蒙皮厚度的 T 型接头缘条与蒙皮之间相对变形的差别会导致 Z-pin 桥联力的差别, 但由于该变形类似, 桥联力的差别较小), 结构首次掉载后, 各 Z-pin 增强 T 型接头可达到的载荷平台是相当的, 且该载荷平台随蒙皮的变厚有降低的趋势。

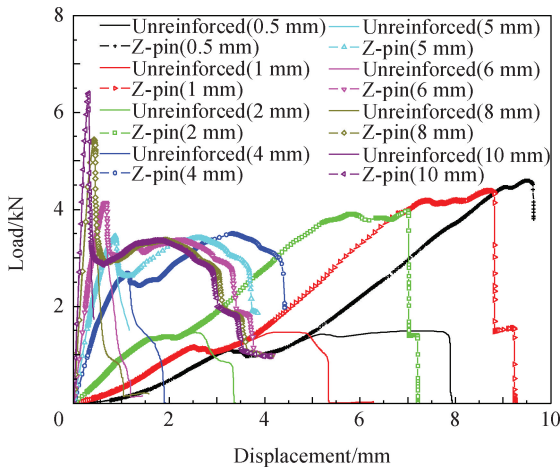


图 10 Z-pin 增强前后不同蒙皮厚度的 T 型接头的载荷-位移曲线的比较

Fig. 10 Comparisons of load-displacement curves of T-joints with different skin thicknesses before and after Z-pin reinforcement

3 结 论

- (1) 蒙皮厚度对 Z-pin 的增强效果影响显著。蒙皮厚度越薄, 未增强件承载能力越低, Z-pin 增强效果越好; 蒙皮越厚, 未增强件承载能力越高, Z-pin 增强效果越差;
- (2) 蒙皮过厚, Z-pin 不能提高结构的最大承载能力, 但可显著提高结构首次掉载后的承载性能, 使 T 型接头在较大的加载位移下仍保持较高的承载能力。
- (3) 无论蒙皮厚薄, 结构首次掉载后, 各 Z-pin 增强 T 型接头可达到的载荷平台是相当的, 且该载荷平台随蒙皮的变厚有降低的趋势。
- (4) 在进行 Z-pin 增强接头的结构设计时, 建议在满足其他设计要求的前提下最大限度地减小蒙皮厚度, 从而降低结构质量, 同时通过 Z-pin 技术提高 T 型接头的最终承载能力。
- (5) 在完成未增强 T 型接头的设计后, 根据已完成的设计确定是否应该布置 Z-pin: 对于厚蒙皮 T 型接头, 可选择不布置 Z-pin; 而对于薄蒙皮 T 型接头, 建议布置 Z-pin 进行增强。
- (6) Z-pin 在简支边界条件下的增强效果较固支边界时要好。

参考文献:

[1] PARTRIDGE I K, CARTIE D D R. Delamination resistant laminates by Z-fiber pinning[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(1): 55-64.

[2] CARTIE D D R, DELL G, POULIN E. 3D reinforcement of stiffener-to-skin T-joints by Z-pinning and tufting[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73(16): 2532-2540.

[3] CARTIE D D R, TROULIS M, PARTRIDGE I K. Delamination of Z-pinned carbon fiber reinforced laminates[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(6): 855-861.

[4] 王鹏. 复合材料 Z-pin 增强技术及力学性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

WANG P. Technical and mechanical properties of the Z-pin reinforced composite[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011 (in Chinese).

[5] PARK Y B, LEE B H, KWEON J H. The strength of composite bonded T-joints transversely reinforced by carbon pins[J]. Composite Structures, 2012, 94(2): 625-634.

[6] 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 Q. Research on cohesive zone model of laminated composites and its applications[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012 (in Chinese).

[7] 李梦佳, 陈普会, 孔斌, 等. Z-pin 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, 2015, 32(2): 571-578.
LI M J, CHEN P H, KONG B, et al. The effect of parameters of Z-pin on the pull-off carrying capacity of composite T-joints[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 571-578 (in Chinese).

[8] PEGORIN F, PINGKARAWAT K, DAYNES S, et al. Influence of z-pin length on the delamination fracture toughness and fatigue resistance of pinned composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 78: 298-307.

[9] KOH T M, FEIH S, MOURITZ A P. Strengthening mechanics of thin and thick composite T-joints reinforced with z-pins[J]. Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(8): 1308-1317.

[10] 段沐枫, 李宁, 郑莹莹, 等. K-cor 夹层结构制备工艺[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(5): 21-25.
DUAN M F, LI N, ZHENG Y Y, et al. Manufacturing processes of K-cor sandwich structure[J]. Aerospace Materials and Technology, 2012, 42(5): 21-25 (in Chinese).

[11] SUN C T, LI S. Three-dimensional effective elastic constants for thick laminates [J]. Journal of Composite Materials, 1988, 22: 626-639.

[12] SUN C T, LIAO W C. Analysis of thick section composite laminates using effective moduli[J]. Composite Materials, 1990, 24(9): 977-993.

[13] BOGDANOVICH A E, DEEPAK B R. Three-dimensional analysis of thick composite plates with multiple layers[J]. Composites Part B: Engineering, 1997, 28(4): 345-357.

[14] GUDMUNDSON P, OSTLUND S. First order analysis of stiffness reduction due to matrix cracking[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(7): 1009-1030.

Influence of skin thickness of T-joint on reinforcing effect of Z-pin

LI Mengjia¹, CHEN Puhui^{1,*}, KONG Bin², PENG Tao², YAO Zhenglan², QIU Xueshi²

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Chengdu 610091, China)

Abstract: This paper is based on the finite element simulation method for Z-pin reinforced T-joints about pull-off load. After the analysis on the test results of specimens with two different skin thicknesses (7.2 mm and 4.0 mm respectively), influence of skin thickness on the reinforcing effect of Z-pin was studied. Results show that the reinforcing effect of Z-pin increases as the thickness of skin decreases. When the skin is thicker than 5 mm, Z-pin cannot increase the maximum load-carrying capacity of structure any more, while Z-pin can still enhance the load-carrying performance after the first peak load, thus make the T-joints remain high load-carrying capacity under big load displacement. Whatever the thickness of skin is, load plateaus of Z-pin reinforced T-joints after first peak load are almost the same and the level of load plateau decreases as the thickness of skin increases.

Keywords: composites; T-joint; Z-pin; skin thickness; finite element simulation