

圆柱、圆锥类构件 Z-pin 自动超声辅助植入平台设计与研究

宋清华 李勇 齐俊伟 丁丽苹 文立伟 肖军

(南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京, 210016)

摘要: Z-pin 技术是一种适用于预浸料成型复合材料层合板并有效改善其层间性能的三维增强技术。本文以圆柱、圆锥类构件的 Z-pin 超声辅助植入技术为研究背景, 开展超声辅助植入的自动化设备研究, 提出超声辅助植入平台的总体规划方案, 设计开发自动超声辅助植入平台, 并提出控制方案, 实现超声辅助植入的自动化。在此基础上, 进行超声辅助植入的工艺实验探索。实验结果表明, Z-pin 超声辅助植入的自动化设备植入效率可达现有手动植入设备的 6 倍以上, 植入质量满足超声辅助植入工艺要求, 为 Z-pin 技术的广泛应用奠定了一定的基础。

关键词: Z-pin; 先进复合材料; 超声辅助植入; 圆柱、圆锥类构件

中图分类号: TB332; V258⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2013)05-0700-08

Design and Research on Z-pin Automatic Ultrasonic Assistant Insertion System for Cylindrical and Conical Shape Parts

Song Qinghua, Li Yong, Qi Junwei, Ding Liping, Wen Liwei, Xiao Jun

(College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: As a three-dimensional layer enhancement technology, Z-pin technology is suitable for manufacturing composite prepreg laminates and also can effectively improve inter laminar properties of composite laminates. In order to manufacture Z-pin cylindrical and conical shape composite parts efficiently, an ultrasonic assistant insertion system is proposed, and the general plan is worked out to meet all the technical requirements of ultrasonic transfer insertion automation. The prototype machine is designed, a series of function debugging are made and verification experiments are carried out on the machine. The results show that the system meets all technical requirements of ultrasonic assistant insertion process. It is capable to carry out ultrasonic assistant insertion automatically, as a result, the system is much more efficient than the existing equipment as much as 6 times.

Key words: Z-pin; advanced composite materials; ultrasonic assistant insertion; cylindrical and conical shape parts

导弹在空中飞行时, 弹体材料承受气流高速冲刷、极其高温、热应力侵蚀、粒子云侵蚀、雨水以及核辐射等恶劣环境^[1]。先进复合材料以其高比强度、高比模量、耐腐蚀性、高度可设计性等优秀性能成为导弹弹体材料的主要材料, 目前多采用耐高温先进复合材料层合结构, 但是层合结构由于层间依靠树脂结合, 在承受气流高速冲刷以及高温热应力

的条件下, 极易产生分层剥离破坏导致材料失效。因此, 应用各种 Z 向增强技术(包括缝合技术、三维编织、Z-pin 增强技术等)提高层合复合材料抗分层性能是航空航天复合材料结构技术的重要研究内容^[2-4]。

Z-pin 增强技术是自 20 世纪 90 年代中期发展起来的一种增强层合复合材料层间韧性的新技术。

与其他三维增强技术相比,该项技术有容易操作、便于控制工艺质量等优点,尤其适于预浸料成形工艺^[5]。

Z-pin 增强技术将针状细杆 Z-pin 植入到未固化的层合构件形成三维增强(图 1),从而提高其层间抗破坏能力。常用的 Z-pin 材料是直径为 0.2~1.0 mm 的高强度、高模量钛合金针和碳纤维针,在摩擦力和材料对其约束的双重作用下,像钉子一样将层合板的各个子层固结在一起^[6]。

20 世纪末,美国 Aztex 公司提出了 Z-pin 超声辅助植入(Ultrasonically assisted Z-fiber, UAZ)工艺方法,将其用于大规模的高速植入 Z-pin。将 Z-pin 植入到未固化的层合板包括两个步骤:首先用数控植入机将 Z-pin 按预先设计的方案植入到泡沫载体中,然后用专用的超声枪将植入到泡沫中的 Z-pin 压入层合板,最后去掉压碎的泡沫(图 1)。UAZ 已成为现阶段应用最广泛的 Z-pin 植入工艺^[7-9]。

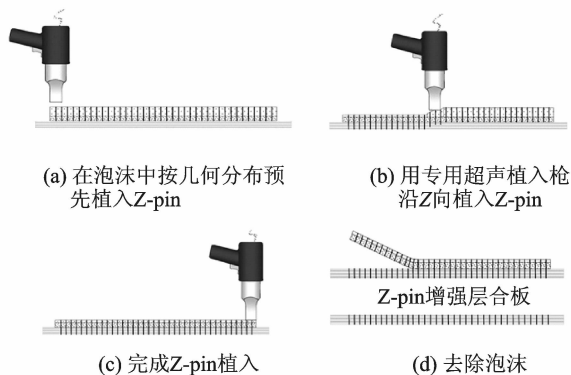


图 1 UAZ[®] 技术工艺过程

Z-pin 增强技术集 Z-pin 装备技术、Z-pin 工艺技术、Z-pin 数控技术以及其他综合技术为一体。英国 Cranfield 大学 Ivana K Partridge 等开发的数控自动超声辅助植入机可精确控制植入压力以及植入速度等工艺参数,而国内尚无此类研究的相关报道。目前,国内对于 Z-pin 技术研究多集中在力学性能以及增韧增强机理方面的研究^[10-12]。与之相关的 Z-pin 产品的制备却停留在较低的水平,南京航空航天大学自动化技术研究中心率先开展了手动超声辅助植入(图 2)的开发与研究^[13],该套设备植入效率低,需要消耗大量人力以及重复劳动,不能满足生产以及实验研究的需求。

本中心在手动超声辅助植入技术基础之上,研制出平板类构件的自动超声辅助植入平台(图 3),该平台植入枪可沿着 X,Y 两方向运动,实现 Z-pin



图 2 手动超声辅助植入设备

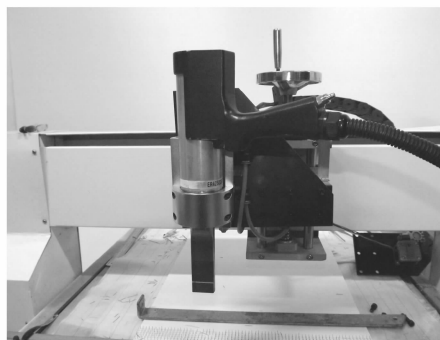


图 3 平板类构件超声辅助植入平台

超声辅助植入的自动化,但此平台只针对平板类构件的 Z-pin 超声辅助植入,圆柱、圆锥类构件(如导弹弹头、弹体材料)的 Z-pin 超声辅助植入仍然无法实现,此类构件植入时,植入枪需沿圆柱、圆锥类构件的母线运动,构件模具安装平台可在 360° 范围内平稳、匀速、正反向自由旋转。针对此类构件的特殊性,设计一套 Z-pin 自动超声辅助植入平台,此平台将适用于底面直径为 450~1 100 mm 的圆柱、圆锥类构件的 Z-pin 自动超声辅助植入。图 4 为此类构件制作的流程图,将预制体铺覆在圆柱/圆锥状模具上,含 Z-pin 的中间体被分割成窄条,依靠预制体的黏性吸附在预制体表面,借助自动超声辅助植入平台将 pin 植入预制体中。本文着重介绍平台的设计及植入结果分析。

1 自动超声辅助植入平台设计

1.1 自动超声辅助植入平台技术要求

Z-pin 自动超声辅助植入平台应具有较好的工艺适应性,在圆柱、圆锥状预浸料铺层上均可以进行 Z-pin 自动超声辅助植入。在 Z-pin 自动植入过程中应能准确调节、定位。转台分度定位误差不大于 $\pm 0.1^\circ$,升降定位误差不大于 ± 1 mm,Z-pin 植入深度误差不大于 ± 1 mm。Z-pin 在圆柱状、圆锥

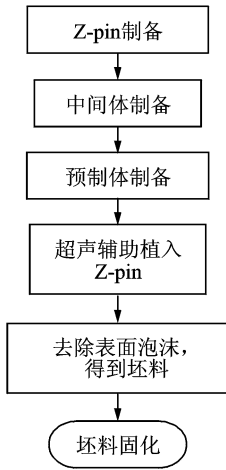


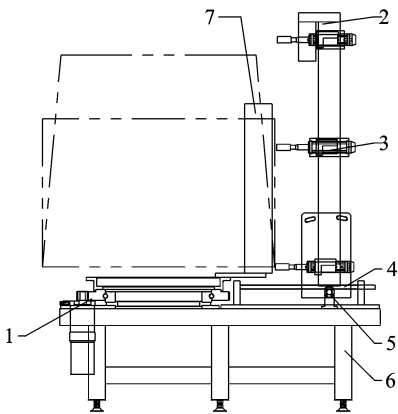
图4 圆柱、圆锥类构件制作流程图

状预浸料铺层上的不同区域,植入深度可调、可控。预浸料树脂体系众多,有些树脂体系在常温下黏度很大,甚至是固体。为保证 Z-pin 的植入质量和效率,减小植入时的阻力,植入平台应设置适当的预浸料铺层加热及测控器件,输出功率不小于 2 kW,其中瓦片模具表面最高温度 60 °C,控制精度 5 °C。

采用离线 CAD/CAM 软件对植入工艺进行设计,软件应具有加工零件建模功能,给定回转体半径、锥角和高度等参数后自动生成植入加工代码文件,供控制系统,使植入平台控制系统实现平台旋转、植入枪升降、进给和植入压力控制。

1.2 自动超声辅助植入平台总体设计方案

图5为 Z-pin 圆台超声辅助植入平台设计简图,平台需要实现的运动:模具安装平台正反向旋转、超声枪升降、植入进给、植入枪与转台间距离调节、植入枪升降滑台摆动角度调节。



1—模具安装平台齿轮传动;2—超声枪上下运动滑台;
3—超声枪;4—超声枪径向位置调节;5—超声枪旋转
角度调节;6—机架;7—预制模具

图5 Z-pin 圆台超声辅助植入平台设计简图

1.2.1 平台旋转方案

根据技术要求已知模具安装平台的负载类型为低速重载,选择回转支承轴承作为承载平台,因为回转支承轴承能够同时承受较大的轴向、径向负荷和倾覆力矩等综合载荷,可以满足旋转平台 700 kg 的承载要求;回转支承轴承为中空结构,有效地减轻了设备质量,并且提供了与模具转接接口,方便安装;回转支承轴承带有安装孔、内齿轮或外齿轮、润滑油孔和密封装置,因而能使设备设计结构紧凑,容易维护。

1.2.2 超声枪升降方案

滚珠丝杠具有较小的驱动力矩以及较高的精度保证,因此本平台采用滚珠丝杠驱动的滑台实现植入枪上下连续或者步进运动,采用步进电机驱动。滚珠丝杠传动效率高,运转阻力小,当电机断电时,容易发生植入枪沿滑台下滑的现象,为了防止该现象的发生,可以选择保持力矩足够大的电机,或者增加其他辅助锁紧装置,这样植入枪在植入过程中可以平稳进给。

1.2.3 超声枪植入进给方案

超声枪植入进给可采用:方案一,植入枪和升降滑台共同运动进给,植入时,滑台与植入枪相对静止;方案二,升降滑台静止,植入枪单独进给。力和运动的传递路径越远,效率越低,传递的可靠性也越低。方案一增加了滑台的运动,是多余的运动。方案二则避免了这个缺点,降低了能源消耗,提高了使用效率和传递可靠性。

1.2.4 模具加热方案

如图6所示,模具加热可选方案有两种。表1为两个方案的对比,其中方案一利用加热片对模具整体进行加热,该方案简单易操作,加热均匀,但未植入区域以及待植入区域也须同时加热,因此产生能源浪费的问题。相比之下,方案二有效地避免了这个问题。采用局部预加热,超声枪在植入当前区域的同时,和超声枪相对静止的加热装置正对下一个植入区域进行加热,当前区域植入完成时,下一个区域刚好加热到设定的温度,模具旋转一个步距,加热装置再对下一个区域加热,依次循环。但是该方法也有其缺点,局部加热容易产生加热不均匀、表面温度与里层温度相差较大等。因此,综合比较两个方案的优缺点,选择简便易行的方案一整体加热。

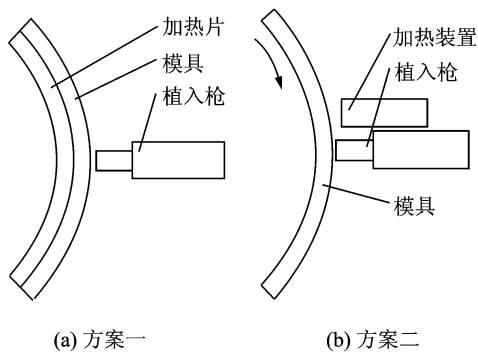


图 6 模具加热方案

表 1 模具加热方案对比

加热方式	整体加热	局部加热
操作简便性	简便	稍显复杂
加热效果	均匀	局部区域加热, 表面温度与里层温度相差较大
能源利用率	不高, 产生浪费	浪费较少

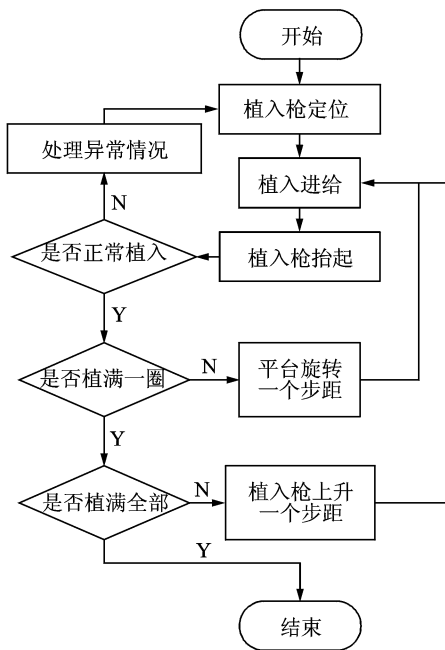


图 7 超声辅助植入流程图

2 自动超声辅助植入平台控制系统研究

超声辅助植入流程如图 7 所示,植入平台控制系统需实现模具安装平台旋转、植入枪升降、进给和植入压力控制,并具有手动调节和局部植入功能,同时采用离线 CAD/CAM 软件对植入工艺进行设计,软件具有加工零件建模功能,给定回转体半径、锥角和高度等参数后自动生成植入加工代码文件,供控制系统。具体控制方案如下:

采用 PLC 控制各个元器件,步进电机选择脉冲加方向控制方式。通过 PLC 发送脉冲至电机驱动器,控制步进电机的连续运转和定位运转,实现平台旋转、超声枪升降。

通过 PLC 的输出指令控制气缸气阀的开关,使用节流阀控制气流量,实现植入枪的进给和植入压力控制。

控制系统选择触摸屏为人机界面,建立触摸屏和 PLC 的通信,通过触摸屏输入加工参数^[14-15],比如回转体半径、锥角和高度等参数,传输相关参数,生成植入加工代码,实现对各个元器件进行控制。

2.1 圆柱类构件植入控制方案

对于圆柱类构件,如图 7 所示植入流程,植入路径为首先植入同一高度层上的所有 Z-pin,植满同一层一圈后,推进到下一个高度的 Z-pin 植入。每一层植入时的步距角以及植入总步数相同,且满

足

$$\theta_0 = l/R \leq b/R \quad (1)$$

$$N = \theta/\theta_0 \quad (2)$$

式中: θ_0 为植入时每个步距的步距角; θ 为构件圆心角; l 为每一步植入的弧长; b 为植入枪宽度; R 为模具半径; N 为每一层植入总步数。

对于高度方向上的总步数,即植入时沿高度方向上的总的层数 N_1 满足

$$N_1 = H/l_1 \leq H/a \quad (3)$$

式中: H 为构件母线长; l_1 为每一层植入高度; a 为植入枪枪头沿母线方向的长度。

因此,对于圆柱类构件,植入时需要在触摸屏上输入以下参数:每次植入的弧长,每一层植入的高度,构件底面半径,构件圆心角,构件母线长(图 8)。



图 8 圆柱类构件植入触摸屏界面

2.2 圆锥类构件植入控制方案

对于圆锥类构件,由于其沿母线方向上每一层

的弧长都在变化,因此每层的步距角以及总的步数都在变化,控制方案将比圆柱类构件稍显复杂。以下将对其进行分析。

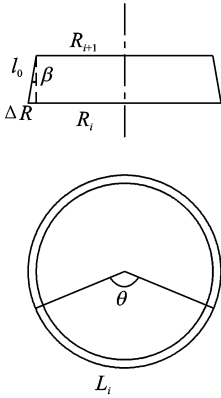


图9 圆锥植入相邻层之间的半径关系

如图9所示,相邻*i*与*i+1*层之间半径有如下关系

$$R_{i+1} = R_i - l_0 \sin\beta \quad (4)$$

式中: l_0 为植入时沿母线方向的步距; β 为圆锥构件的半锥角; R_i 和 R_{i+1} 分别为相邻两层的半径。

由式(4)可看出,所有层的半径是一个等差数列,通项公式为

$$R_i = R_1 - (i-1) l_0 \sin\beta \quad (5)$$

因此,第*i*层总弧长 L_i 满足

$$L_i = R_i \cdot \theta = [R_1 - (i-1) l_0 \sin\beta] \cdot \theta \quad (6)$$

式中: θ 为构件圆心角。

设定所有层的植入过程中,每次的植入弧长 L_0 不变,则每一层植入的步距角 θ_i 和每层植入总步数 N_i 分别满足

$$\theta_i = L_0 / R_i = L_0 / [R_1 - (i-1) l_0 \sin\beta] \quad (7)$$

$$N_i = L_i / L_0 = [R_1 - (i-1) l_0 \sin\beta] \cdot \theta / L_0 \quad (8)$$

构件母线长为 l ,则总层数 n 满足

$$n = l / l_0 \quad (9)$$

由以上分析得,对于圆锥类零件需要输入的参数为构件底面半径、构件圆心角、构件母线长、构件半锥角、每步弧长以及沿母线方向步距长(图10)。

3 实验验证与分析

根据Z-pin超声辅助植入平台的设计方案,在已设计完成的原理样机上(图11),设计实验以验证方案的可行性以及所选元器件的合理性。

同时,验证实验应最大地利用植入平台的所有功能,尽可能多的在实验过程中发现已有方案存在的不足之处,探索改进方案,优化已有植入系统,为

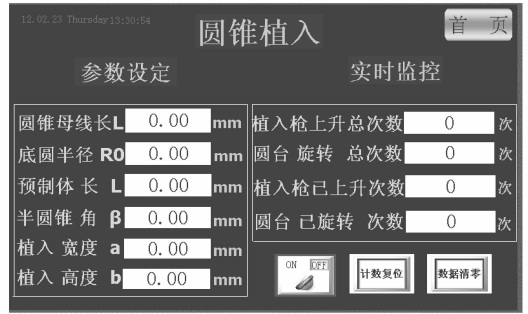


图10 圆锥类构件植入触摸屏界面



图11 自动超声辅助植入平台

建立更完善的系统奠定基础。

3.1 实验工艺条件

本实验以Z-pin增强某复合材料航天构件的制备为背景,根据其性能要求和工作条件,设计实验参数如下。

- (1)模具尺寸:1/4圆柱,圆心角 90° ,半径为527 mm,高度700 mm;
- (2)Z-pin材料体系:环氧树脂+碳纤维体系;
- (3)Z-pin固化度:50%~70%;
- (4)Z-pin尺寸:直径为0.3 mm;
- (5)植入密度:2 mm×2 mm和4 mm×4 mm两种类型;
- (6)Z-pin制备工艺:拉挤成形工艺;
- (7)载体泡沫材料:聚苯乙烯,厚度6 mm;
- (8)预浸料铺层材料体系:双马树脂、碳纤维布;
- (9)铺层设计:25层,厚度5 mm;
- (10)植入枪尺寸:21 mm×30 mm;
- (11)超声辅助植入枪超声频率:40 kHz。

3.2 实验平台控制系统调试

在原理样机设计完成的基础上,对控制系统进行调试。

(1)输入信号的调试:利用 USB 接口建立电脑与 PLC 的通信,对 PLC 的所有开关量的输入点,用手动的方法使这些输入点分别动作,通过电脑屏幕检查信号状态或者观察相应的信号灯是否点亮。

(2)输出信号的调试:采用强制输出信号的方法,对 PLC 的各个开关量输出点发出动作信号,检查对应输出信号灯是否相应的熄灭或点亮。

(3)自动超声辅助植入动作调试:建立了触摸屏与 PLC 的通信,通过触摸屏输入相关加工参数,启动自动开关,观察平台的各个动作是否符合要求以及各个动作之间的衔接是否连贯。

调试结果显示,输入输出信号可靠,植入平台满足自动化植入的要求。

3.3 存在问题及解决方案

超声辅助植入过程中(图 12),当植入枪边缘刚与某一排 Z-pin 平齐,植入枪进给动作将造成这一排 Z-pin 倾斜,最终影响制品的性能。

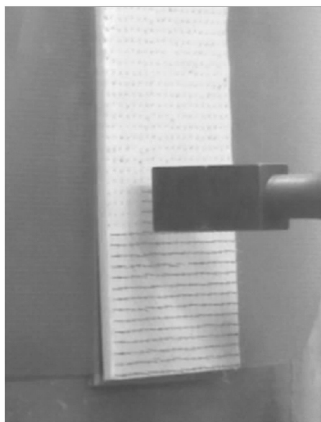


图 12 植入枪边缘与一排 Z-pin 平齐

3.3.1 原因分析

如图 13 所示,过渡预植入体中 Z-pin 间距为 a ,植入枪移动步距为 b 。

预浸料铺层 预植入体 超声植入枪

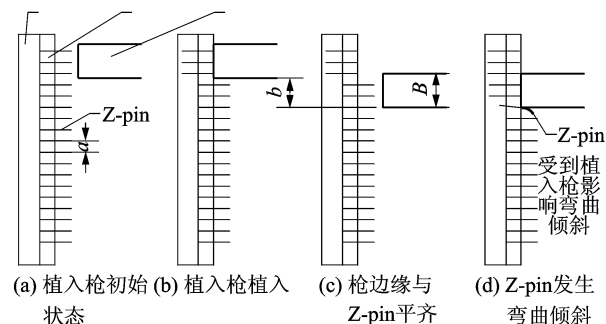


图 13 植入枪运动过程示意图

假定初始状态:植入枪边缘在两排 Z-pin 的中间位置(图 13(a))。若

$$b = (n + 0.5)a \quad (10)$$

式中: n 为整数; a 为 Z-pin 间距; b 为植入枪移动步距;当 b 满足式(10)时,如图 13(c)所示,植入枪边缘与某排 Z-pin 平齐,此时,若植入枪进给,该排 Z-pin 将不能顺利植入,向外弯曲倾斜。

3.3.2 解决方案

如上分析,超声辅助植入过程中,应避免植入枪边缘与 Z-pin 平齐。规定植入的初始状态:植入枪边缘在两排 Z-pin 中间,植入枪移动的步距满足

$$b = na \quad (11)$$

并且

$$b \leq B \quad (12)$$

式中: B 为植入枪宽度;当 b 同时满足式(11,12)时,可以确保植入过程中不会出现植入枪把 Z-pin 压倾斜的状况。

3.4 植入结果分析

本实验所用碳纤维/环氧 Z-pin 中间体如图 14 所示(200 mm×200 mm)。经超声辅助植入后去除泡沫的预浸料坯料如图 15 所示。

200 mm×200 mm 的 Z-pin 预制体手动超声辅助植入时,大约需 1 h 才能完成植入,使用自动超声辅助植入时,仅需 10 min 左右,植入效率得到了明显的提高,完全可以满足生产需求。

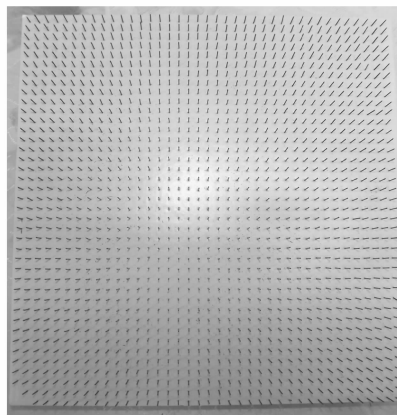


图 14 含 Z-pin 中间体

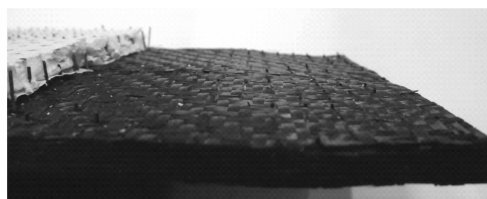
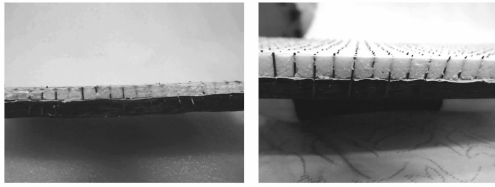


图 15 去除泡沫的预浸料坯料

图 16 为超声辅助植入后预浸料坯料的截面图。从图中可以明显看出,手动超声辅助植入后,预浸料坯料中的 pin 发生了不同程度的倾斜,这是由于操作人员人为的不稳定因素所造成的;使用自动超声辅助植入平台植入的预浸料坯料,坯料中的 pin 完全按照 Z 向植入,实现对预浸料坯料的 Z 向增强,符合超声辅助植入工艺要求。



(a) 手动超声辅助植入 (b) 自动超声辅助植入

图 16 超声辅助植入后预浸料坯料的截面图

3.5 Z-pin 增强层合板结合强度实验研究

层间断裂韧性是层合复合材料的一个重要指标,复合材料的破坏模式一般为裂纹的扩展,它的形式主要有 3 种:张开型、面内剪切型和面外剪切型,分别定义为 I 型、II 型和 III 型裂纹^[2]。为了重点研究 Z-pin 与面板的结合情况,本文采用双悬臂梁实验的方式对 I 型裂纹进行了 Z-pin 增强复合材料 I 型层间断裂韧性实验研究(Double cantilever beam,DCB)。

将试样预置裂纹用薄刀片轻轻分开后即可进行实验,通过对比双马层合板 Z-pin 为 $\Phi 0.3 \text{ mm}$ 不同植入密度 I 型层间断裂韧性实验结果,空白试样的 I 型层间断裂韧性 0.58 kJ/m^2 , 2×2 试样的植入密度为 4.78 kJ/m^2 ,提高 8.24 倍,可以看出 Z-pin 的植入明显提高了层合板的层间断裂韧性。从实验结果柱状图(图 17)可以清晰地看到这个趋势。

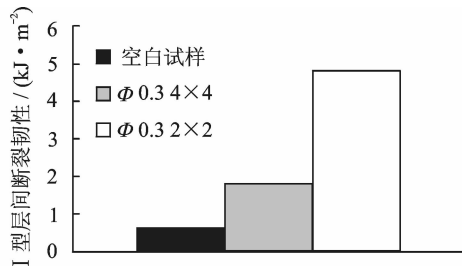


图 17 DCB 密度比较实验结果柱状图

4 结束语

Z-pin 自动超声辅助植入平台在实现对圆柱、圆锥类构件超声辅助植入的同时,大大减少手工劳

动,降低人力资源成本,同时提高植入精度,推动 Z-pin 技术在国防事业的应用,为 Z-pin 技术商业产品化研究奠定基础;采用 PLC-触摸屏结合的电控方案,使系统结构简洁、紧凑,提高了控制程序和人机界面的灵活性。

虽然此平台可以实现圆柱、圆锥类构件的自动超声辅助植入,但针对航空航天某些具有复杂曲面的构件,仍然无法实现自动超声辅助植入。本中心在此基础上,正自主研发具有 6 自由度的 6 轴联动机器人超声辅助植入平台,此平台可以实现任意曲面构件的自动超声辅助植入,推动 Z-pin 技术的进一步广泛应用。

参考文献:

- [1] 李勇,肖军. 复合材料纤维铺放技术及其应用[J]. 纤维复合材料, 2002, 9(3): 39-41.
Li Yong, Xiao Jun. The technology and application of fiber placement[J]. Fiber Composites, 2002, 9(3): 39-41.
- [2] 孙涛. Z-pin 增强树脂基层合板制备与力学性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.
Sun Tao. Research on preparation process and mechanical properties of the laminates reinforced with Z-pin[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010.
- [3] 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,2010.
Wang Peng. Research on preparation process and mechanical properties of the laminates reinforced with Z-pin[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010.
- [4] 沃丁注. 复合材料大全[M]. 北京:化学工业出版社,2000.
Wo Dingzhu. Encyclopedia of composites[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [5] 王晓旭,陈利. 复合材料 Z-pinning 技术的应用与发展[J]. 宇航材料工艺, 2009(6): 10-14.
Wang Xiaoxu, Chen Li. Application and development of Z-pinning composite technology[J]. Aerospace Materials & Technology, 2009(6): 10-14.
- [6] 孙涛,李勇,王鹏,等. 层合复合材料 Z-pin 增强技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2009(15): 43-45.
Sun Tao, Li Yong, Wang Peng, et al. Research progress of Z-pin reinforced composite laminate[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(15): 43-45.
- [7] Boyce J S, Hanover R, Wallis R, et al. Composite structure reinforcement; USA, 4808461[P]. 1989-

- 02-28.
- [8] Boyce J S, Freitas G A, Magee C L, et al. Ultrasonic fastening system and method; USA, WO 98/29243 [P]. 1998-09-01.
- [9] Grassi M, Zhang X, Meo M. Prediction of stiffness and stresses in z-fibre reinforced composite laminate [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2002, 33(12): 1653-1664.
- [10] Zhang Xiangyang, Li Yong, Xiao Jun, et al. Pultrusion of polybenzoxazine resin matrix Z-pin [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 29(3): 237-244.
- [11] 单杭英,肖军,李宁,等. X-cor 类层结构的平压性能 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2012, 44(2): 251-356.
- Shan Hangying, Xiao Jun, Li Ning, et al. Compressive properties of X-cor sandwich [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 44(2): 251-256.
- [12] 李勇,肖军,谭永刚,等. X-cor 类层结构剪切模量实验与分析 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2008, 40(6): 831-835.
- Li Yong, Xiao Jun, Tan Yonggang, et al. Experiment and analysis on shear modulus of X-cor sandwich structures [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2008, 40(6): 831-835.
- [13] 马丹. Z-pin 增强双马来酰亚胺层合板制备及力学性能研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
- Ma Dan. Research on preparation process and mechanical properties of Z-pinned BMI composite laminates [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010.
- [14] 齐凤莲,陈晓男,赵民,等. 基于触摸屏与 PLC 的自动镗铣床控制系统研究 [J]. *制造技术与机床*, 2012(6): 177-180.
- Qi Fenglian, Chen Xiaonan, Zhao Min, et al. Research on automatic boring-milling machine control system based on touch screen and PLC [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2012(6): 177-180.
- [15] 吕品. PLC 和触摸屏组合控制系统的应用 [J]. *自动化仪表*, 2010(8): 45-47, 51.
- Lü Pin. Application of control system composed of PLC and touch screen [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2010(8): 45-47, 51.

