

# Z-Pin/RTM 成型工艺影响因素分析及工艺研究

## Analysis of the Effect of Control Variables to the Z-Pin/RTM Molding Process

中航复合材料有限责任公司 马金瑞 黄峰 赵龙 吴刚 张宪华 卓鹏

**[摘要]** 分析了 Z-Pin 技术在复合材料 RTM 成型工艺中应用时需控制的关键因素,并采用 Z-Pin/RTM 工艺成型复合材料工字梁典型件进行工艺研究。结果表明,采用 Z-Pin/RTM 工艺成型后的复合材料典型件具有良好的外观和内部质量,该研究结果为早日实现 Z-Pin 技术在飞机结构上的应用提供了参考。

**关键词:** Z-Pin 复合材料 RTM

**[ABSTRACT]** The main control variables of Z-Pin process, used in RTM composites manufacturing process, are analyzed. The I-beam structure is used in analyzing the Z-Pin/RTM process. The results show that the specimens after Z-Pin show excellent surface and inner quality. This research is the earlier stage study of Z-Pin process which could be used in real aircraft structure in the future.

**Keywords:** Z-Pin Composites RTM

近年来,为了改善传统复合材料层间性能差、界面连接强度低、冲击损伤容限低和制造成本高等特点,国内外在韧性树脂体系开发与 Z 向增强技术<sup>[1-4]</sup>(缝合、编织和 Z-Pin 等)等新材料和新工艺方面开展了大量的研究工作。其中,Z-Pin 技术以其质量轻、成本低、工艺操作简单、整体化程度高与界面连接强度高优势,在国内外得到重视和应用。但是,目前此项技术研究主要集中在增强预浸料和陶瓷基复合材料方面<sup>[5-6]</sup>。中航复合材料有限责任公司是国内率先开展 Z-Pin 增强干态纤维叠层研究,并结合 RTM 工艺成型复合材料的研究机构。Z-Pin/RTM 成型工艺主要有以下优势:(1)具有较好的结构适用性,可一次性制备成型具有非开敞结构的复合材料构件;(2)Z-Pin 工序可以在零件成型工装上进行,无需借助专用的操作台。

本文分析了 Z-Pin 技术在复合材料 RTM 成型工艺中应用时需控制的关键因素,通过对非开敞结构的工字梁典型件的研制,验证了 Z-Pin/RTM 成型工艺的可行性。

### 1 Z-Pin/RTM 成型工艺影响因素分析

从工艺角度来讲,Z-Pin/RTM 成型工艺包括 Z-Pin 增强预成型制备工艺和 Z-Pin 增强复合材料 RTM 成型

工艺。

#### 1.1 Z-Pin 增强预成型体制备工艺

Z-Pin 增强预成型体的设计取决于构件的结构设计,因此需针对构件的具体结构形式制定与其相适应的 Z-Pin 增强预成型体制备方案。Z-Pin 增强预成型体的制备包括干态纤维的铺叠和 Z-Pin 植入 2 大工序步骤。

对液体成型工艺而言,采用的纤维增强体刚开始是干态的,其预成型体的可操作性依赖于预成型体的刚性和整体性。在实际干态纤维铺叠过程中,需采用层间定位胶来提高纤维布的层间稳定性,然后采用预压实手段获得刚性纤维粘合体。

目前,应用最广泛的 Z-Pin 植入工艺为将坚硬的已固化的纤维/树脂复合物针状细棒(直径通常为 0.2~0.6mm)植入未固化的层合板,使 Pin 针像钉子一样将层合板的各个子层固结在一起,如图 1 所示。该过程是采用专用的超声波枪(如图 2),将以正交的形式排布在泡沫载体中的 Pin 针(该中间产品称为 Z-Pin 预制体,如图 3 所示)植入未固化的层合板,最后通过特殊刀具切除多余的长度并移除泡沫载体。

影响 Z-Pin 植入效果的主要因素有预成型体自身特性(结构形式、厚度、材龄、预压实程度)、植入静压力、植入速率以及超声波振幅等,同时这些因素在 Z-Pin 过程中是相互关联、相互影响的。

(1)预成型体自身特性。预成型体结构形式、厚度、材龄和预压实程度都是预成型体自身特性,而这些特性最终影响到的是预成型体的刚性。由于 Pin 针直径很细,约为 0.2~0.6mm,在 Pin 针植入过程中,为避免 Pin 针的屈曲和断裂,需降低预成型体的刚性;但当植入完毕去除泡沫层时,为降低刀具对 Pin 针的剪切作用,避免 Pin 针产生倾斜角,则要求预成型体有一定的刚性,使 Pin 针在摩擦力的约束下,将叠层连接在一起。

(2)植入静压力。在 Z-Pin 技术中,要对 Pin 针施加一定的压力才能将其植入层合板中,压力过小不能顺利地进入材料内部,而压力过大会对 Pin 针造成损伤。植入静压力的选择取决于 Pin 针的长度和预成型体的自身特性。

(3)超声波振幅。增大超声波枪的振幅可以实现

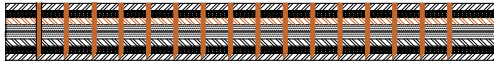


图1 Z-Pin增强复合材料示意图  
Fig.1 Z-Pinned Composites



图2 超声波枪  
Fig.2 Ultrasonic Z-pinning tool

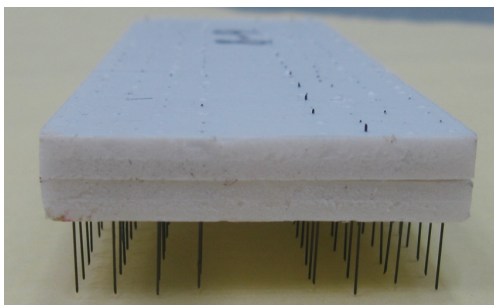


图3 Z-Pin预制品  
Fig.3 Z-Pins in foam preform

快速植入,但植入速率太快会导致 Pin 针承受超额的压力而被压垮,或造成 Pin 针无法穿透整个预成型体厚度。植入速度过慢会造成预制品过热而存在着火的风险。

可见,如果不对 Z-Pin 植入过程中各种工艺及材料参数进行控制,很难保证 Pin 针植入的质量与效率。

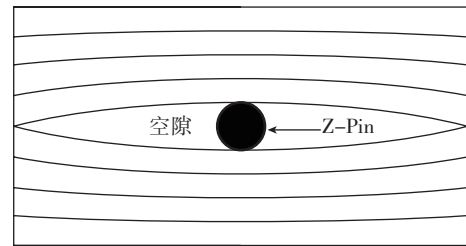
### 1.2 Z-Pin 增强复合材料 RTM 成型工艺

RTM 工艺的基本原理是先在模腔内铺放预成型体,然后在压力或真空作用力下将树脂注入闭合模腔,浸润纤维,固化后脱模。与其他复合材料工艺相比,其特点是黏性树脂需在复杂结构预成型体这一多孔介质中流经较长距离,因此控制的重点是树脂注射过程。

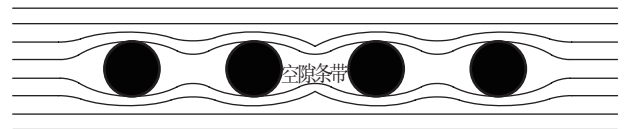
预成型体的结构设计,影响到树脂在预成型体中的渗透率和树脂的注射过程中的压力和时间等参数,同时这些参数在成型过程中是相互关联和影响的。

(1) 预成型体的渗透率。渗透率是描述预成型体对树脂流动阻力的物理参数,渗透率决定着树脂在预成型体中的流动方向和速度,进而影响到模具的进、出胶口和流道布局等关键结构的设计。渗透率的方向和大小取决于预成型体的本身的结构参数。Pin 针的引入使预成型体的微观结构发生变化,其中最明显的微观结构变化是,由于纤维的直径远小于 Pin 针的直径,Z-Pin 过

程中针孔附近纤维被挤压到两边,两边纤维弯曲变形,而中间形成椭圆形空隙,如图 4 所示。



(a) Z-Pin 周围的空隙



(b) Z-Pin 周围的空隙条带

图4 Z-Pin增强复合材料微观结构  
Fig.4 Micrograph of Z-Pinned Composites

随着 Pin 针直径和植入密度的增大,Pin 针周围的椭圆形空隙形成了连续的空隙条带。这些空隙条带为高渗透率区域,形成了树脂的优先通道,会导致“流道效应”或“短路效应”的发生。即树脂将优先在空隙通道区域内发生流动和渗透,可能在未完全充满预成型体前就到达出胶口,进而使制品出现干斑缺陷。因此需结合预成型体具体的结构形式,确定树脂的流道布局。

(2) 树脂注射压力。对于纤维体积分数高的预成型体,为了缩短成型周期,提高浸渗速率,通常需提高注射压力,但高的注射压力会将 Pin 针的排列方向冲乱。

可见,如果不对树脂的注射过程进行有效设计和控制,很难保证 Z-Pin 增强复合材料制品的成型质量。

## 2 工艺试验部分

### 2.1 试验材料

(1) 树脂体系。QY8911-IV,北京航空制造工程研究所;(2) 增强织物。碳 VII 帘子布,浙江舟山市岱山飞舟新材料;(3) Z-Pin 材料。T300 碳纤维/NH3P-1 双马树脂,南京航空航天大学。

### 2.2 试验设备

GW-16 高温试验室,无锡南亚设备有限公司提供。

### 2.3 试验过程

为了考核 Z-Pin 增强大厚度预成型体的可行性,考核高密度 Z-Pin 增强复合材料的 RTM 成型工艺的适用性,本试验选取具有非开敞结构的工字梁典型件开展 Z-Pin/RTM 整体成型工艺研究和技术验证。具体的试验件结构参数如下:

工字梁典型件理论外形尺寸:长度 1300mm,宽度 260mm,高度 220mm,蒙皮铺层 (45/0/-45/90/0/45/0/-

45/0/45/0/-45/90/0/45/0/-45/0)s, 蒙皮厚度 7.2mm, 腹板铺层 (45/-45/0/45/-45/90/45/-45/0)s, 腹板厚度 3.6mm, 结构示意图见图 5。该典型结构单元是由 4 个预成型体组元和填充物通过 RTM 工艺一次浸渍成型, 见图 6。其中子层 1、2 与子层 3 界面, 子层 1、2 与子层 4 界面采用 Z-Pin 技术增强, Pin 针直径为 0.5mm, 单侧凸缘的 Pin 针行数为 7 行, “针距 \* 行距”为“3mm \* 3mm”, 内侧 Pin 针距离对称面为 7mm, 两侧都进行 Z-Pin 增强处理。R 区填充物采用干态碳 VII 帘子布。工字梁试验件的工艺流程图见图 7。

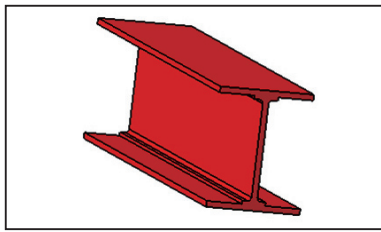


图5 工字梁典型件结构示意图  
Fig.5 Composites with I-beam structure

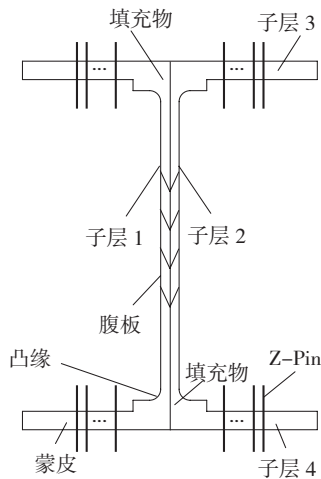


图6 工字梁典型结构单元  
Fig.6 Typical Structure

在预成型体制备过程中, 子层 1 和子层 2 在各自的模具上采用碳 VII 帘子布和层间定位胶铺叠。子层 3 和子层 4 采用碳 VII 帘子布和层间定位胶在平台上铺叠。Z-Pin 技术将独立的预成型体组元子层 1、2 和子层 3 直接在零件成型模具上组合成上蒙皮预成型体组件。当子层 4 铺放后, 整个预成型体变成非开敞结构, 鉴于 Z-Pin 技术操作时只需单面接触零件, 后续的 Z-Pin 工序亦在零件成型工装上进行, 无需借助专用操作台。由于 Z-Pin 区域的厚度约为 9.0mm, 为了降低植入难度, 提高植入质量和效率, 本研究分别从 Z-Pin 材料和预成型体 2 个方面进行改进。

(1) Z-Pin 材料方面。

改变 Pin 针形态, 将 Pin 针植入端加工成斜角, 增加

Pin 针植入端的锋利程度, 从而提高 Pin 针的植入效率, 见图 8。

(2) 预成型体方面。Z-Pin 前将预成型体进行热处理, 使分布在相邻纤维层间的定位胶熔化, 预成型体由室温下的刚性纤维粘合体软化带有一定粘性纤维粘合体, 从而降低 Z-Pin 植入时的阻力。

通过以上改进 Pin 针形态和对预成型体增加预处理

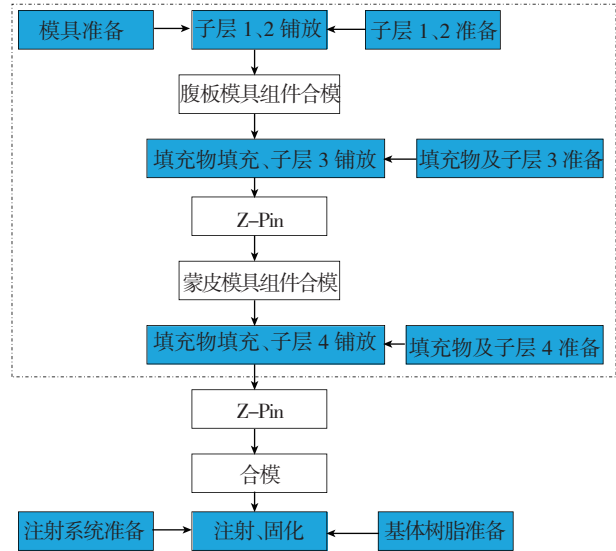
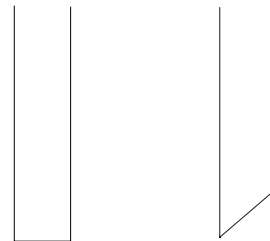


图7 流程图

Fig.7 Figure of process



(a)改进前 Pin 针的形态 (b)改进后的 Pin 针的形态

图8 改进后的Pin针的形态

Fig.8 Z-Pin condition before and after improvement

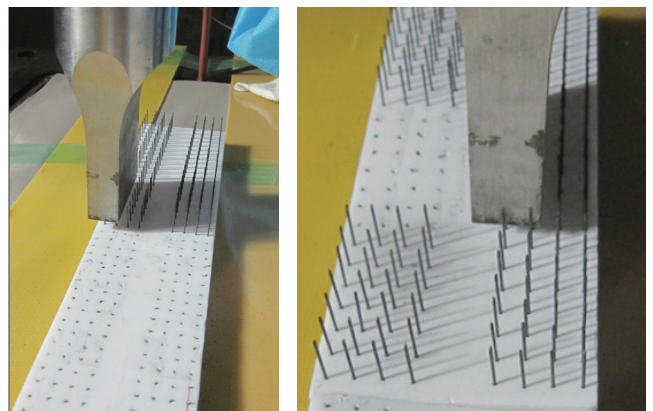


图9 Z-Pin植入过程照片

Fig.9 Ultrasonically assisted z-pinning process.

理的方法,在提高 Z-Pin 植入厚预成型体的可操作性的同时,提高了植入质量与效率。图 9 为 Z-Pin 植入过程照片。

在树脂注射过程中,为实现树脂对 Z-Pin 增强复合材料制件的良好注射,就必须解决因 Pin 针引入而导致的树脂注射难题,本研究拟采取的因工作措施如下。

(1) 优化进、出胶口的设置。进、出胶口设置时除要考虑确保树脂能够流动均匀,浸透整个预成型体外,还要尽量保证在低压时快速完成树脂的注射,以降低注射压力对 Pin 针排列方向的影响。结合以往的 RTM 模具设计经验,将进胶口设计在模腔中心附近的位置,且采用多点注射,将出胶口设计在模腔两端。采用此种方案不仅使树脂的流动路线最小,还有效减少了注射压力和注射时间。

(2) 设计和控制树脂的流动分布和流动路线。如前所述,相对于非 Z-Pin 区域,Z-Pin 区域为高渗透率区域,为了避免流动效应的产生,需对整个预成型体中树脂的流动分布和流动路线进行设计和控制。在非 Z-Pin 区域设置快速分布树脂的通道,提高该区域的渗透率;同时,在 Z-Pin 区域设置阻力区,使树脂流动时通过该区域的阻力增大,降低树脂流动速度。采用此种方案,减少了 Z-Pin 区域和非 Z-Pin 的渗透率不一致而带来的树脂流动不一致的问题,实现了树脂对预成型体的均匀渗透。

## 2.4 试验结果与分析

(1) 表面质量。

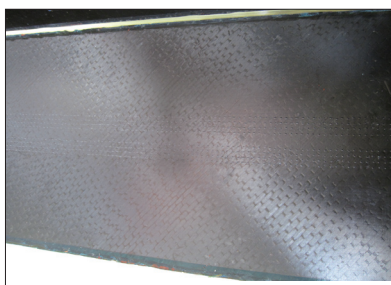


图10 成型后的工字梁试验件

Fig.10 Composites with I-beam structure



图11 Z-Pin后的零件表面

Fig.11 Surface of the Z-Pinned composites

从成型后的结果来看,见图 10 和图 11,工字梁典型件表面平整,光滑,无铺层皱折、凹坑和凸起,无树脂堆积或贫胶等缺陷;植入后的 Z-Pin 区域表面均匀,Pin 针端部无分叉、开裂;Pin 钉均匀统一穿透制件凸缘与蒙皮厚度区域;且在本典型件 Z-Pin 区域内未发现 Pin 钉的重叠和缺失,植入行间距和列间距均满足 3mm 设计要求。

(2) 超声无损检测结果。对试验件进行超声无损检测,底波清晰,内部未发现贫胶、分层、气孔或疏松等缺陷。

(3) 厚度检测结果。对试验件进行厚度检测,检测区域分别为工字梁上下蒙皮区域(A1 区和 A2 区),上下凸缘与蒙皮结合区,即 Z-Pin 区域(B1 区和 B2 区),腹板区域(C 区)。每个区域均匀得测 10 个点,厚度测试结果如表 1。

结果表明,采用 Z-Pin/RTM 工艺成型的复合材料工字梁典型件,无论蒙皮区,凸缘/蒙皮结合区,还是腹板区,厚度极限偏差均  $< \pm 4\%$ ,尺寸稳定性好,满足要求。

表1 试验件的厚度测试结果

区域	理论值/mm	实测值/mm	极限偏差/%
A1 区	7.20	7.21 ± 0.17	2.5
A2 区	7.20	7.20 ± 0.15	2.1
B1 区	9.00	9.21 ± 0.06	3
B2 区	9.00	9.23 ± 0.06	3.2
C 区	3.60	3.6 ± 0.14	3.8

## 3 结束语

优化的 Z-Pin/RTM 成型工艺具有良好的工艺适用性,可以实现大厚度、高 Z-Pin 密度、具有复杂结构复合材料整体构件的成型,成型后的复合材料构件具有较高的表面质量和内部质量,该研究结果为早日实现 Z-Pin 技术在飞机结构上的应用提供了参考。

## 参考文献

- [1] 刘强,赵龙,卓鹏,等.VARI 技术在民机襟翼结构上的应用研究.航空制造技术,2013,22:80-84.
- [2] 姜茂川,赵龙,刘强,等.VARI 液体成型工艺制备复合材料帽型泡沫夹芯构件的工艺模拟及验证.复合材料学报,2013,30:266-272.
- [3] 刘强,赵龙,曹正华,等.VARI 工艺成型纤维增强树脂复合材料层合板厚度和纤维体积分数的影响因素.复合材料学报,2013,30(6):90-95.
- [4] 高艳秋,赵龙,刘强,等.面向航空结构的高性能 VARI 复合材料技术.航空制造技术,2013,15:66-69.
- [5] 陶永强,矫桂琼,王波,等.搭接长度对 Z-Pins 增强陶瓷基复合材料接头连接性能的影响.材料科学与工程学院,2008,26(4):593-598.
- [6] 郑锡涛,李泽江,杨帆.Z-Pin 增强复合材料层合板断裂韧性试验研究.缝合材料科学,2010,27(4):180-188. (责编 圭一)