

高加筋壁板结构树脂膜渗透(RFI)技术研究

Study on the Resin Film Infusion (RFI) Process in Manufacturing High Stiffener Structure

中航复合材料有限责任公司 高艳秋 赵龙 吴刚 刘强 黄峰 张宪华

[摘要] 传统 RFI 工艺的树脂渗透原理决定了其所成型零件高度方向的尺寸必然受到限制,一定程度上限制了 RFI 工艺在航空领域的应用。提出了一种新的 RFI 工艺树脂流动控制方法,并建立了新的树脂流动模型,突破了传统 RFI 工艺对加筋高度的限制,降低了传统 RFI 工艺对树脂粘度和工作时间的过分依赖,可实现任意高度加筋壁板结构 RFI 工艺成型,提高了 RFI 工艺的结构适用性,为低成本液体成型技术在航空结构上的扩大应用奠定了基础。

关键词: 高加筋壁板 整体成型 RFI

[ABSTRACT] In the traditional RFI process, the height of the integrated stiffener made is limited due to the infusion theory, which restricted the applications of the RFI process in the aircraft industry. In this study, a new resin flow control method is invented and a new resin flow model is built. The height of the stiffener will no longer be the limit for the RFI process. The excessive reliance on the resin viscosity and processing time in the traditional RFI process is weakened. Structures with integrated stiffener of any height can be made. This new method improves the applicability of the RFI process and may lay a foundation on the application of low-cost liquid molding technology in the aircraft industry.

Keywords: High stiffener structure Integrated process RFI

树脂基复合材料由于具有较高的比强度和比刚度,因而近年来在航空航天领域得到广泛应用,其用量水平已经成为衡量武器系统先进性的一项重要标志。但随着树脂基复合材料用量的扩大,传统树脂基复合材料的弱点也开始暴露出来,突出表现为较高的制造成本和较低的损伤容限。

复合材料液体成型技术(包括 RTM、RFI、VARI)由于工艺上具有成型效率高、成本低、污染小,并可以结合缝合、编织等三维增强技术实现复合材料整体成型的优点,因而成为国内外复合材料领域大力提倡和发展的重要技术。其中,RFI(Resin Film Infusion,树脂膜渗透技

术)是一种适合大型构件整体成型的液体成型技术,它可以结合缝合技术提高结构完整性,通过减少紧固件的数量和装配工作量,大大降低复合材料的制造成本,因而 RFI 成型技术自 20 世纪 80 年代出现以来倍受关注。

1 RFI 技术国内外研究情况

美国、澳大利亚、日本及欧洲等均在液体成型领域进行了大量的研究工作,其中最具代表性的是美国的先进复合材料技术研究计划(Advanced Composites Technology, ACT 计划)和先进轻型飞机机身结构计划(Advanced Lightweight Structure Technology Program, ALAFS 计划)。这些计划的核心之一就是通过工艺、材料、设计的综合,实现复合材料结构的高减重和低成本。

ACT 计划是美国航空航天局(NASA)提出并组织实施的。主要目标是研究开发新的复合材料结构形式及相应的设计分析方法和制造方法,改善结构的损伤容限,降低结构的制造成本。NASA 率先在 ACT 计划中开展了缝合整体成型复合材料技术研究,并强调高性能复合材料的低成本制造工艺技术的研究与应用,RFI 是 ACT 计划主要涉及的一项低成本制造技术。

ACT 计划以发展 21 世纪高速运输机机身和机翼为牵引,选择了 10 多种材料,从基础研究到技术验证,最后到技术应用。经过 10 多年的研究,NASA 在纺织复合材料的设计、分析、制造方面积累了宝贵的财富。为适应新型飞机制造的需要,NASA 和波音公司投资逾千万美元开发了最新一代的专用缝合设备。依靠先进的设备,波音公司采用缝合和 RFI 技术成功地完成了半翼展机翼壁板的研制,并进行了半翼展机翼盒段地面试验。该翼盒长度为 42ft(1ft=0.3048m),蒙皮、梁、肋、长桁等通过缝合组成整体,由 RFI 方法固化成型,试验证明其完全能够满足设计载荷的要求。该成果标志着 ACT 计划取得了突破性的进展。缝合/RFI 技术的应用,省去了数千个机械连接件,与传统的热压罐法、纤维缠绕法和三维编织法相比,费用可减少 50%;与传统的铝合金结构相比,采用该方法制造新型飞机机翼结构,成本可下降 20%,减重达 25%。

ALAFS 计划是美国空军莱特试验室及美国海军航

空兵总司令部联合提出的。该计划确定了翼身整体设计、机翼结构布局、内部管路设置、机身油箱设计、梁的布置、内部筋条布置和上下大梁连续性设计 7 大关键技术,以织物复合材料技术及 RTM、RFI 技术作为实现其总体目标的主要技术途径,能最终完成一个全尺寸的 F/A-18E/F 机身及机翼的制造,并将其装到 F/A-18E/F 试验机上进行新技术的演示验证。



图1 空客A380复合材料后压力框
Fig.1 Composites rear pressure bulkhead of Airbus A380

空客 A380 飞机的后压力框是关闭机舱后端的“墙”,要承受飞行增压时整个内舱的力,其高为 6.9m,宽为 6.6m,深为 1.5m (见图 1)。这种曲率大的复杂结构的制造需要新的制造方法,因此 EADS 公司研究中心、空客及供应商开发了缝合 /RFI 工艺,并用于压力框的制造,即先将干态碳纤维织物制备成所需形状(即预成型体),然后浸渍树脂并固化。

国内从 20 世纪 90 年代后期开始复合材料缝合及 RFI 成型工艺研究,并在“九五”和“十五”预研期间开设专题,在专用树脂体系研发、预成型体制备技术、缝合复合材料设计 / 强度分析技术、成型工艺以及缝合复合材料结构在飞机油箱区域可用性研究等方面均取得了较大的进展。采用国内树脂体系的复合材料缝合板材的冲击后,压缩强度提高了 100% 左右,与国外的研究结果相近。

通过缝合 /RFI 技术,已研制出尺寸为 1.9m × 1.02m、带有 4 根“T”型加筋复合材料机翼壁板和尺寸为 1.0m × 0.5m、带有“π”型加筋的机翼壁板及复合材料机身壁板典型件等。

2 传统树脂膜渗透工艺存在的不足及改进

传统的树脂膜渗透复合材料成型方法,是先将加筋、蒙皮等制备成纤维预成型体,再根据成型零件总的铺层面积及铺层层数等计算出壁板蒙皮及加筋所需树脂的总量,然后将树脂制备成膜放置在模具型腔预成型体的底部,利用升温过程中树脂熔融渗透到预成型体内的纤维中完成树脂与纤维的浸润过程,最后按照树脂的

工艺规范要求固化成型,如图 2 所示。

此种渗透方法,由于树脂膜放置在预成型体底部,工艺过程中树脂的渗透主要是由下至上进行,逐渐渗透

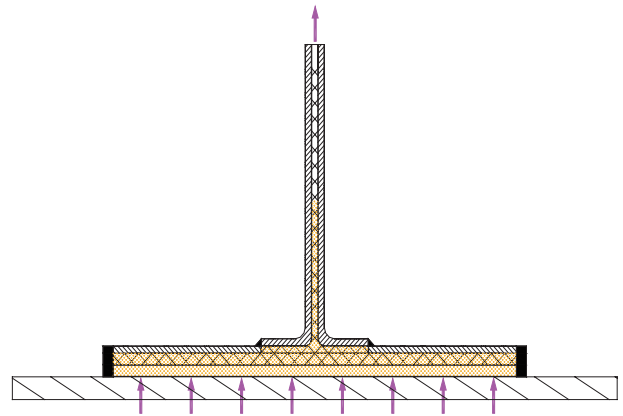


图2 传统RFI成型方法
Fig.2 Traditional RFI process

到预成型体的最高处纤维中去,而对于加筋壁板类复合材料零件,树脂在加筋内是沿着路径相对较长的预成型体面内方向流动,加筋高度方向的尺寸越大,树脂从底部浸润整个加筋内纤维的时间就越长,对树脂的粘度指标要求也就越高。当流动时间超过树脂渗透温度条件下的工作时间时,加筋预成型体顶端就会出现干斑或贫胶等质量缺陷,因此采用传统的 RFI 工艺成型高性能复合材料加筋壁板类零件对树脂的粘度和加筋的高度都有一定的限制。

以目前 RFI 工艺树脂为例,在树脂渗透温度条件下可操作时间仅为 1h,若继续保温则树脂的粘度会急剧上升,具体可见图 3。

采用液体成型工艺的模拟软件 PAM-RTM 对高加筋壁板的 RFI 树脂渗透过程进行模拟,其中纤维选用通用性较强的 U7192 碳纤维机织物,模拟结果见图 4。

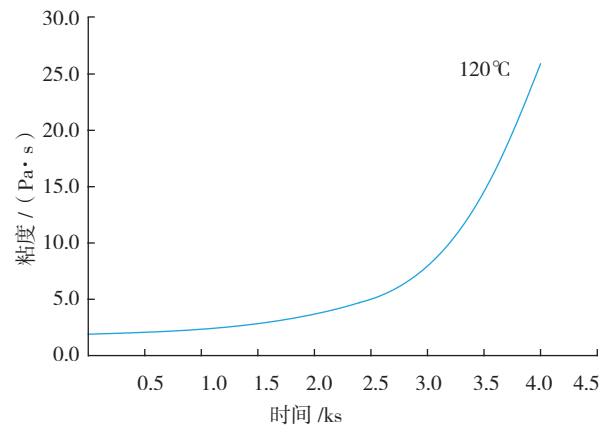


图3 树脂在渗透温度条件下的恒温粘度曲线
Fig.3 Resin isothermal viscosity curve under infusion temperature

模拟结果显示,当树脂上升到一定高度,由于粘度

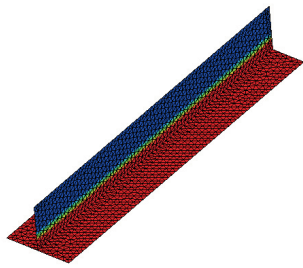


图4 传统RFI成型方法树脂膜渗透模拟

Fig.4 Resin infusion simulation of traditional RFI process

升高导致树脂渗透过程终止。受树脂粘度和工作时间的影 响,最终的渗透高度不超过 95mm。可以看出,采用传统的 RFI 工艺成型复合材料加筋壁板类零件,由于树脂流动路径长,树脂达到加筋顶部需要较长的渗透时间,不仅成型效率低,而且风险大,一旦出现局部纤维浸润不到位则造成整个零件报废。

随着复合材料用量的增加,对结构性能和制造成本都提出了更高的要求。越来越多的飞机结构需要采用高性能、低成本的树脂膜渗透成型技术,通过树脂膜渗透成型技术与缝合技术结合提高加筋与蒙皮的界面强度、结构的抗冲击损伤性能,实现结构减重和降低成本的目标。为增加结构刚度,高加筋壁板结构是飞机结构设计中经常采用的一种结构形式。针对飞机复合材料结构对 RFI 工艺越来越多的需求,必须对传统 RFI 工艺进行改进,建立新的 RFI 工艺树脂流动模型,降低传统 RFI 工艺对树脂粘度和工作时间的过分依赖,突破传统 RFI 工艺对加筋高度的限制,打破工艺局限,实现更多结构的 RFI 整体成型。

考虑大尺寸复杂加筋壁板结构成型的需要,新的 RFI 工艺树脂流动模型使树脂无论在蒙皮还是加筋区域均以面的形式迅速渗透到预成型体蒙皮和加筋的纤维中去,如图 5 所示。

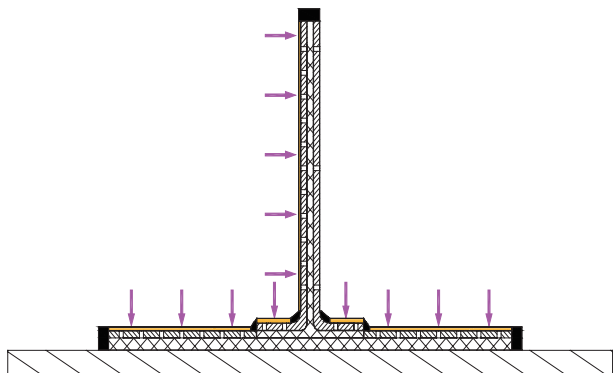


图5 改进后树脂在预成型体内流动模型示意图

Fig.5 Resin flow model in the preform after improvement

新的树脂流动模型中,树脂沿垂直于蒙皮和加筋

表面的方向渗透,路径短,渗透迅速,成型效率高,这就使 RFI 工艺具有了更好的结构适用性和可靠性。与传统的树脂膜渗透成型方法相比,一方面取消了传统树脂膜渗透工艺对加筋高度、壁板厚度及结构复杂程度的限制,避免了由于某些区域(特别是加筋顶部)树脂达不到而出现贫胶、干斑等现象,提高了所成型复合材料零件的质量和工艺可靠性,使 RFI 这一高性能、低成本的复合材料整体成型技术能以更高的质量和工艺可靠性应用于更多的复合材料结构。另一方面,新的树脂流动模型更有利于保证零件外型精度及表面质量,满足高性能复合材料构件的设计和使用要求。

3 RFI 技术在高加筋壁板结构上的应用

高加筋壁板结构典型件外廓尺寸为 900mm × 600mm × 110mm,壁板蒙皮两端厚 6mm,中间厚 3.6mm,要求采用缝合技术将两侧 2 根“工”型纵墙、中间 3 根“J”型纵墙的下凸缘与壁板蒙皮进行缝合,然后通过 RFI 工艺进行整体成型。该加筋壁板的纵墙高度达到 107mm,如果采用传统 RFI 工艺,由于受树脂粘度限制,很可能在树脂转移完成前发生凝胶现象,导致零件报废,采用新的 RFI 工艺树脂流动控制方法成型后的零件如图 6 所示。

典型件厚度测量点见图 7,厚度公差要求 ±5%,厚

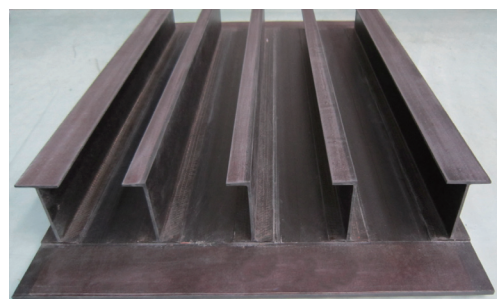


图6 高加筋壁板典型件

Fig.6 Panel structure with high stiffeners

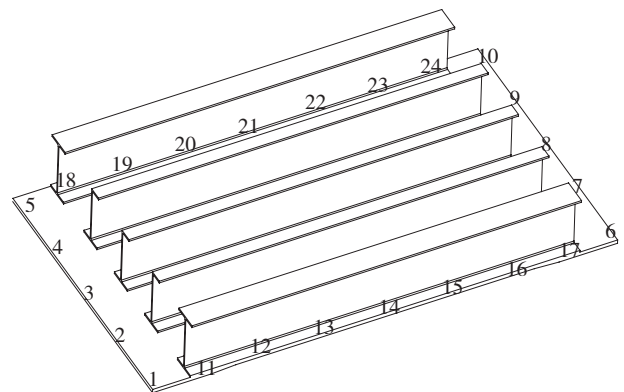


图7 高加筋壁板典型件厚度测量点示意图

Fig.7 Test points of panel structure with high stiffeners

表1 高加筋壁板典型件厚度测量值

测量点编号	实测数据 /mm	厚度公差 /mm	测量点编号	实测数据 /mm	厚度公差 /mm
1	6.18	5.70~6.30	13	6.7	6.27~6.93
2	6.17	5.70~6.30	14	6.71	6.27~6.93
3	6.16	5.70~6.30	15	6.72	6.27~6.93
4	6.1	5.70~6.30	16	6.7	6.27~6.93
5	5.84	5.70~6.30	17	9.36	8.55~9.45
6	6.11	5.70~6.30	18	9.45	8.55~9.45
7	6.15	5.70~6.30	19	6.69	6.27~6.93
8	6.12	5.70~6.30	20	6.64	6.27~6.93
9	6.04	5.70~6.30	21	6.72	6.27~6.93
10	5.82	5.70~6.30	22	6.68	6.27~6.93
11	9.43	8.55~9.45	23	6.64	6.27~6.93
12	6.68	6.27~6.93	24	9.44	8.55~9.45

度测量点 1~10 的厚度范围为 5.70~6.30mm, 11、17、18、24 的厚度范围为 8.55~9.45mm, 12~16、19~23 的厚度范围为 6.27~6.93mm, 实测数据见表 1。计算得知, 典型件的纤维体积含量达到 59.4%, 试验结果满足设计要求。

4 结束语

(1) 针对传统 RFI 工艺存在的不足, 建立了新的 RFI 工艺树脂流动模型, 打破了传统 RFI 工艺的局限, 使 RFI 工艺具有更好的结构适用性, 突破了 RFI 工艺对加筋高度的限制, 实现了任意高度复合材料加筋壁板结构的 RFI 整体成型。

(2) 新的 RFI 工艺树脂流动模型使树脂在工艺过程中以面的形式迅速渗透到预成型体的纤维中去, 大大缩短了树脂渗透时间, 不仅成型效率得以提高, 同时降低了 RFI 工艺对树脂粘度和工作时间的过分依赖, 提高了所成型复合材料零件的质量和工艺可靠性。

(3) 缝合 /RFI 整体成型技术已成功应用于飞机结构, 保持了结构完整性, 使机械连接数量降到最低, 有效减轻了结构重量。
(责编 谷雨)

(上接第 51 页)

区, 这些空洞三角区(图 6)本身就是气体与树脂的填充多发区, 如果预浸料在这些位置出现纤维松散就增加了缺陷产生的概率。

实际生产也暴露出了这一点, 国产碳纤维零件, 此类 L 形筋条缺陷多发生在筋条根部图示区域, 缺陷位置与尺寸呈规律性分布。但这种情况只出现在某些批次的纤维上。

3 结论

国产碳纤维与进口碳纤维 T300 存在一定的差异,

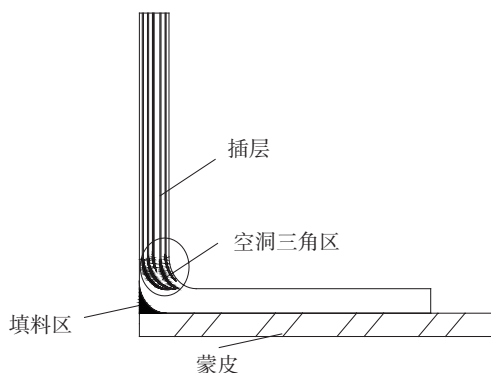


图6 空洞三角区示意图

Fig.6 Schematic empty triangle

主要表现在:(1) 纤维的基本性能。国产碳纤维与 T300 纤维的线密度统计上有显著差异, 国产碳纤维较离散, 拉伸强度与弹性模量未有显著差异, 国产碳纤维拉伸强度略优于 T300。(2) 预浸料排布。国产碳纤维由于线密度不匀, 排布时影响纤维的展开效果, 个别预浸料表面状态呈现局部纤维松散或富树脂现象, 另外, 纤维表面起毛的情况也偶有发生, 预浸料表面有纤维团。(3) 制件。国产碳纤维体系的普通简单结构的制件质量可与 T300 体系媲美, 但对于结构复杂, 对预浸料均匀性要求较高的某些制件批产后会产生一定影响。

国产碳纤维规模化应用势在必行, 国内一些优秀的纤维厂家生产的纤维也已经基本具备了满足生产的条件, 到目前为止, 生产的几十件壁板出现的缺陷进口纤维体系壁板也同样存在, 只是对于 L 形筋条出现缺陷的概率略高, 其他类型的制件合格率与进口纤维相当。

参考文献

[1] 张凤翻, 申屠年. 国产碳纤维规模化应用值得注意的工艺问题. 高科技纤维与应用, 2008, 33 (3):1-4.

(责编 深蓝)