

大尺寸复合材料“工”形加筋壁板研制

Manufacturing of Large Composites Panel With I-Stiffeners

中航工业复合材料技术中心 杨博 王菲 陈永清 侯军生

[摘要] 本文使用高温固化环氧碳纤维预浸料 CCF300/BA9916-II, 采用共固化的成型方案, 研制了大尺寸复合材料“工”形加筋壁板。研制的加筋壁板很好地满足了设计要求, 证明了共固化成型方案是切实可行的, 为大尺寸复合材料加筋壁板研制提供了新的方案选择。

关键词: “工”形加筋壁板 大尺寸 共固化 复合材料

[ABSTRACT] The manufacturing process of large scale CFRP panel with I-stiffeners using CCF300/BA9916-II prepreg is introduced. The quality of the composite panel perfectly matches the need of designer, which proves the technology of co-curing is feasible, and it provides a new choice for the manufacturing of large scale CFRP panel.

Keywords: Panel with I-stiffeners Large scale Co-curing Composites

复合材料以其高比强度 / 比刚度、抗疲劳、可设计性好和易于整体成形等一系列优点, 在航空航天领域得到广泛应用, 其用量高低成为衡量飞行器先进性的重要指标。近几年, 复合材料在大飞机上的应用从次承力结构迅速扩展到主承力结构, 其用量从 25% 左右激增到 52% 左右。在大飞机领域, 空客军用运输机 A400M 在机翼上使用了复合材料, 波音 B787 和空客 A350 在机翼和机身上均使用了复合材料。

大尺寸复合材料加筋壁板是大飞机复合材料主承力结构的主要结构形式, 其制造能力对扩大复合材料在大飞机上的应用具有重要影响。本文介绍一种基于热压罐固化的大尺寸复合材料工字加筋壁板的制造技术。

1 大尺寸复合材料“工”形加筋壁板介绍

1.1 壁板结构

复合材料加筋壁板长约 10m, 宽约 3m; 蒙皮厚度大, 变厚度, 蒙皮上有多处台阶, 台阶坡度较大; 长桁长约 7m, 其截面为工形, 如图 1 所示。

1.2 壁板原材料

预浸料: CCF300/BA9916-II 预浸料, 中航复合材料有限责任公司生产; 胶粘剂: J-116B 高温结构胶粘剂,

黑龙江石油化工研究院生产。

1.3 主要技术指标

- (1) 外观质量: 外表面光滑平整;
- (2) 内部质量: 分层、脱粘等缺陷在可控范围; 孔隙率 $< 1.5\%$;
- (3) 厚度控制: 理论厚度的 $\pm 5\%$;
- (4) 长桁轴线度: 肋轴线处 $\pm 1\text{mm}$, 其余处 $\pm 1.5\text{mm}$;
- (5) 贴模度: 壁板在自由状态下的贴模度 $\leq 0.5\text{mm}$;
- (6) 随炉件力学性能满足相关材料技术规范。

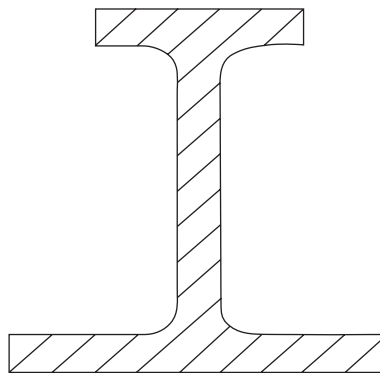


图1 长桁的工形截面示意图

Fig.1 Structure of stringer

2 大尺寸复合材料“工”形加筋壁板研制

2.1 成型方案选择

成型方案的选择是复合材料加筋壁板类零件制造的基础和关键问题。复合材料加筋壁板类零件常用的成型方案主要 3 种: 胶接共固化(蒙皮先固化再与长桁胶接共固化、长桁先固化再与蒙皮胶接共固化)、共固化和二次胶接。成型方案选择的主要依据是: 在保证复合材料零件成型质量的前提下, 尽量降低制造成本。针对需要研制的加筋壁板的结构特点(蒙皮变厚度, 台阶多, 台阶坡度大; 壁板尺寸大; 外形公差要求高), 为保证加筋壁板的质量(主要是胶接质量和外形尺寸), 选择了工艺要求高的共固化成型方案, 其成型方案的比较如表 1。

2.2 制造工艺流程

大尺寸复合材料工字加筋壁板的主要制造工艺流程如图 2。

表1 壁板成型方案比较

成型方案	成型方案描述	方案比较
二次胶接	蒙皮和长桁分别固化,再通过胶膜进行胶接	工艺简单,但蒙皮和长桁尺寸大,胶接面的配合精度要求高,协调困难,胶接质量不易保证 进罐成本:进罐次数多,成本高
胶接共固化	蒙皮先固化,与未固化的长桁胶接共固化 长桁先固化,与未固化的蒙皮胶接共固化	工艺较为简单,与二次胶接方案类似,胶接面的配合精度要求高,协调困难,胶接质量不易保证 进罐成本:进罐次数较多,成本较高
共固化	将未固化的长桁和蒙皮一次固化而成	工艺要求高,但胶接质量易于保证,且壁板外形好 进罐成本:进罐次数少,成本较低

2.3 制造工艺

2.3.1 模具设计和制造

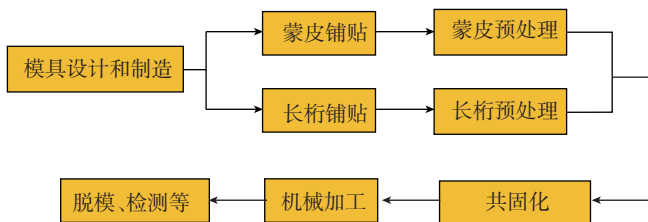


图2 工艺流程图

Fig.2 Manufacturing process

大尺寸复合材料加筋壁板的成型模具主要包括蒙皮成形模、长桁成形模和长桁定位工装等。

2.3.1.1 模具材料的选用

复合材料的成型模具常用的材料有普通钢、殷钢和复合材料等,其优缺点见表2。对于大尺寸复合材料,成型模具的热膨胀系数对复合材料零件质量的影响较大,为了保证零件的外形和内部质量,选用殷钢材料^[1]。

2.3.1.2 蒙皮成形模

蒙皮成形模采用常规的框架式模具,如图3所示。

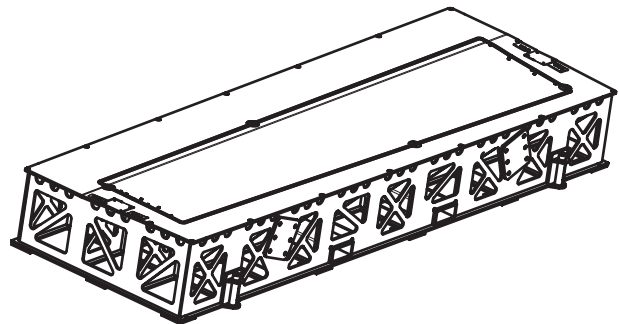


图3 蒙皮成形模示意图

Fig.3 Forming mold of skin

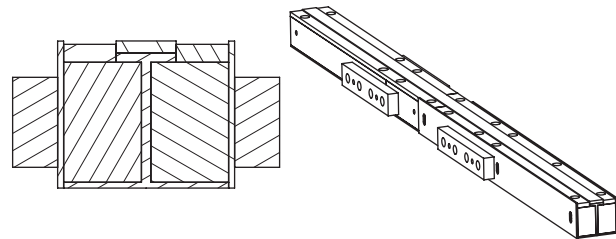


图4 长桁成形模具示意图

Fig.4 Forming mold of stringer

表2 模具材料的比较

序号	模具材料	优点	缺点
1	普通钢	材料成本低 加工成本低 耐久性好	热膨胀系数大 密度大,重量大
2	殷钢	热膨胀系数较小 耐久性好	材料成本高 加工成本较高 密度大,重量大
3	复合材料	热膨胀系数较小 密度小,重量轻	材料成本高 加工成本高 高温下使用,耐久性较差

2.3.1.3 长桁成型模具

由于长桁长度大,受目前金属模具材料性能和制造技术的限制,加工不出整根的加强筋成型模具。针对这个问题,开发了一种大尺寸复合材料加强筋的组合式、“净尺寸”的成型模具^[2],其结构见图4。此处“净尺寸”

是指成型出来的长桁的上缘和下缘的宽度就是需要的理论宽度,不需要额外的机械加工,可以节约原材料,减少制造工序,降低制造成本。

2.3.1.4 长桁定位工装

由于长桁长度大,常规的两端定位方式已不能保证长桁轴线度的要求。针对这个问题,开发了一种大尺寸复合材料加强筋的成型定位方法^[3],其结构见图5。

2.3.2 蒙皮和长桁的下料和铺贴

由于蒙皮尺寸大,需自动铺带的方式进行蒙皮铺贴,但因蒙皮的厚度变化多,台阶多、台阶坡度大、自动铺带机不能满足要求,最终蒙皮采用自动下料机下料,激光投影仪定位,人工铺贴的方式进行。其基本过程为:在设计提供的数模基础上,根据制造需要确定铺层余量;根据预浸料的幅宽,进行铺层的切割划分;对切割划分的铺层进行可制造性分析,根据处理的结果进行铺层切割优化;根据处理后的铺层,生成铺层下料文件和

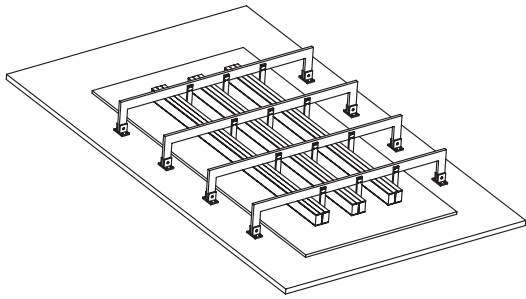


图5 长桁定位工装示意图
Fig.5 Position mold of stringer



图6 自动下料机
Fig.6 Automatic cutting machine

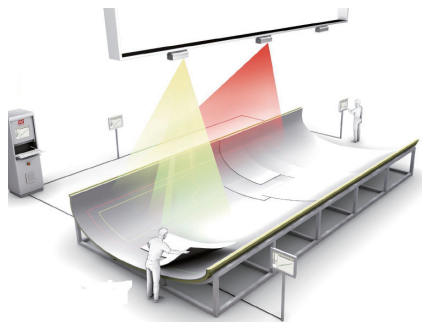


图7 激光投影定位
Fig.7 Laser projector system

投影文件;将生成的铺层下料文件输入自动下料机(见图6),进行自动下料;将生成的投影文件输入激光投影仪,进行铺层的激光投影定位(见图7),人工进行铺贴。

长桁的下料和铺贴相对简单,根据长桁的基本几何尺寸,留出一定的工艺余量,用自动下料机下料,在长桁成型模上进行铺贴,切掉余量,抽真空压实。

2.3.3 蒙皮和长桁的预处理

为了更好地保证“工”字加筋壁板的成型质量,对铺贴后的蒙皮和长桁进行预处理,预处理工艺如图8所示,具体工艺可以根据实际需要作相应调整。

2.3.4 蒙皮和长桁的共固化成型

将经过预处理后的蒙皮和长桁组装在一起,进行共固化,共固化工艺按 CCF300/BA9916-II 预浸料的固化工艺进行^[4-5]。需要指出的是,采用共固化方案制造加筋壁板,很容易出现长桁沉入蒙皮中以及蒙皮外形面出

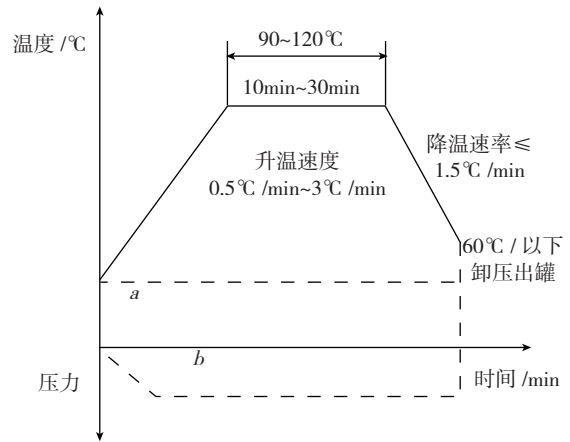


图8 预处理工艺
Fig.8 Autoclave pre-cure cycle

印痕的问题,针对这些问题,开发了一种复合材料壁板类结构的共固化成型模具^[6],如图9所示。

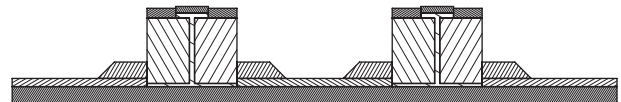


图9 共固化成型模具
Fig.9 Mold of co-cure

3 大尺寸复合材料“工”形加筋壁板质量检测

对大尺寸复合材料工字加筋壁板进行外观质量、内部质量和外形尺寸等一系列检测,检测结果表明,研制的壁板很好地满足了设计要求,具体如下。

3.1 外观质量

壁板制件的表面光滑平整,单向带、织物纤维清晰可见,表面纤维被树脂均匀覆盖。可以看出,研制的壁板很好地克服了共固化成型方案容易出现长桁沉入蒙皮之中及蒙皮外形面出印痕的问题。

3.2 内部质量

用 FCC-B-1 和 MTU-1 超声检测仪对壁板制件进行无损检测,蒙皮和长桁自身,以及长桁和蒙皮胶接处未见超标缺陷。从切割下的壁板余量处取样制作金相试样,测得其孔隙率远小于 1%,金相照片如图 10 所示。多次壁板研制表明,采用零吸胶/常温加压的 CCF300/BA9916-II 预浸料的工艺简单,复合材料制件质量稳定,满足大尺寸、大厚度复合材料制件的工艺要求。

3.3 厚度控制

用 CL-400 测厚仪和千分尺测量分别测量蒙皮和长桁厚度,结果表明,蒙皮厚度为 2~10mm 时,厚度公差 $\leq \pm 4\%$;厚度为 10~30mm 时,厚度公差 $\leq \pm 3\%$;厚度为大于 30mm 时,厚度公差 $\leq \pm 2.5\%$;长桁厚度公差 $\leq \pm 5\%$,很好地满足了设计要求。

3.4 长桁轴线度

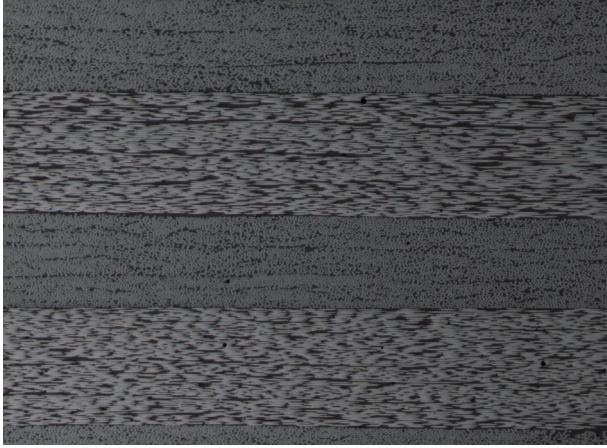


图10 金相照片
Fig.10 Microstructure of laminate

用 Leica AT-901 LR 激光跟踪仪测量长桁轴线度, 肋轴线处 $\pm 1\text{mm}$, 其余处 $\pm 1.5\text{mm}$, 满足设计要求, 表明开发的共固化成型模具和定位工装是合理可靠的。

3.5 贴模度

壁板脱模后, 重新放在蒙皮成型模上, 在不施加外力的情况下对壁板进行贴模度检查, 壁板四周的贴模度用塞尺测量, 壁板中间的贴模度用 Minitest2100 和 CL-400 测量。测量结果为: 壁板四周贴模度 $\leq 0.2\text{mm}$, 壁板中间贴模度 $\leq 0.4\text{mm}$, 满足了设计要求。

3.6 随炉件性能

对放置在模具上靠近热压罐罐门和热压罐尾部的不同批次的随炉件进行力学性能测定, 其结果均满足设计要求(表3)。

表3 随炉件的力学性能

批次	随炉件位置	弯曲强度 /MPa	层剪强度 /MPa
1	罐门	1708.52	109.94
	罐尾	1736.77	108.71
2	罐门	1699.72	109.93
	罐尾	1743.58	110.23
3	罐门	1752.34	105.47
	罐尾	1744.19	105.27
4	罐门	1697.81	101.94
	罐尾	1710.84	102.27

4 结束语

(1) 研制的大尺寸复合材料“工”形加筋壁板很好地满足了设计要求;(2) 为大尺寸、复杂内形面的加筋壁板提供一种共固化的成型方案;(3) 提出的复合材料工形长桁成型模具、长桁定位工装和共固化成型模具方案等是合理的, 可行的;(4) 采用零吸胶 / 常温加压的 CCF300/BA9916-II 预浸料的工艺简单, 制件质量稳定,

满足大尺寸、大厚度复合材料制件的工艺要求。

参考文献

- [1] 杨博, 李宏, 曹正华. 殷钢在复合材料成形模具中的应用. 玻璃钢 / 复合材料. 2010(6):68-69.
- [2] 陈永清, 杨博, 王菲. 大尺寸复合材料工字形加强筋的成型模具. 专利申请号 201110232619.1.
- [3] 陈永清, 杨博, 王菲. 大尺寸复合材料壁板成型模具的加强筋定位机构. 专利申请号 201110232430.2.
- [4] 孙占红, 李小兵, 刘天舒, 等. CCF300/BA9916-II 环氧预浸料及其复合材料性能研究. 第 17 届全国复合材料学术论文集, 398-400.
- [5] 杨博, 陈永清, 曹正华. 大厚度碳纤维复合材料层压板的试制. 航空制造技术, 2009 增刊:73-74.
- [6] 陈永清, 杨博, 王菲等. 一种复合材料壁板类结构的共固化成型模具. 专利申请号 201110362129.3.

(责编 小城)

(上接第 111 页)

化的层压板影响较大, 在溶剂增加到 $60\text{ml}/\text{m}^2$ 时, 层压板出现了大面积分层、疏松状态。而在 0.6MPa 压力下固化的层压板孔隙率在少量溶剂加入的情况下变化不大, 随着溶剂量的加大, 孔隙率仍然在 2% 以下。因此可以得出, 固化压力较低时, 外部加入的挥发性溶剂对层压板孔隙率的影响较大, 固化压力较大时, 挥发性溶剂对层压板孔隙率的影响不明显。

3 结论

(1) 固化压力对孔隙率的大小有至关重要的影响, 固化过程中常温加压有利于减小层压板孔隙率;(2) 固化过程中同样的固化压力下, 减小真空压力有利于减小层压板孔隙率;(3) 在固化压力较小的情况下, 外部加入的少量挥发性溶剂会导致层压板孔隙率急剧增大, 而固化压力较大时, 外部的少量挥发性溶剂对层压板孔隙率影响不大。

参考文献

- [1] 陈绍杰. 大型飞机与复合材料. 航空制造技术, 2008, 15: 32-35.
- [2] Judd N C W, Wright W W. Voids and their effects on the menhanical properties of composites—An appraisal. SAMPEJ, 1978, 14(1):10-14.
- [3] 朱洪艳, 李地红, 张东兴, 等. 孔隙率对碳纤维 / 环氧树脂复合材料层合板湿热性能的影响. 复合材料学报, 2010; 27(2):24-29.
- [4] Kardos J L, Dave R. Voids in composite //proceeding ASME: The Manufacturing Science of Composite. New York: ASME, 1988, 4:41-48.
- [5] Kardos J L, Dudukovic M P, Dave R. Void growth and resin transport during the processing of thermosetting matrix composites. Advances in polymer science, q986, 80:101-123. (责编 亿霖)