

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.10.035

# 民用飞机 VARI 碳纤维复合材料性能研究

朱苗<sup>1,\*</sup>, 高丽红<sup>2</sup>, 刘刚<sup>2</sup>, 刘强<sup>3</sup>, 吴一波<sup>4</sup>

1. 西安飞机工业(集团)有限责任公司, 陕西 西安 710089

2. 航空工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

3. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300

4. 卢森堡赫氏控股卢森堡有限责任公司, 上海 200235

**摘要:**针对多批次的 RTM6-2 树脂和 G0926 SB 1304 TcJ InJ E01 2F 织物, 对采用低成本真空辅助树脂渗透成形工艺 (VARI) 制备的该碳纤维复合材料开展了性能验证及评价研究, 具体包括: 对比分析了三批次的物理性能以及不同环境 (温度和湿度) 条件下 5 批次的 VARI 碳纤维复合材料力学性能, 获得了 VARI 碳纤维复合材料的基本性能数据。这为民用飞机用树脂基复合材料的设计、优化选材以及技术指标的确定、材料规范的制定等奠定了基础, 也为其在民用飞机上的应用和适航符合性验证提供了一定的依据。

**关键词:** VARI; 批次; 物理性能; 力学性能; 试验环境; 碳纤维复合材料

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2017) 10-0035-05

先进树脂基复合材料具有比强度高和结构可设计等优点, 在航空领域内已得到了广泛应用, 其应用部件也已由次承力结构件日趋发展到主承力结构件 (机翼、机身和尾翼等部位), 且应用逐步扩大。目前, 航空用先进树脂基复合材料主要采用预浸料/热压罐工艺制备。由于该工艺需要多个步骤才能实现复合材料的整体成形, 且热压罐价格昂贵、能耗高以及原材料低温储存等, 其制造成本占了 60%~70%<sup>[1-9]</sup>。因此, 低成本及整体性复合材料制备工艺是当今复合材料制备发展的一个重要方向, 如树脂传递模塑 (RTM)、树脂膜渗透 (RFI) 和真空辅助树脂渗透 (VARI) 等。其中, VARI 工艺已广泛应用于复合材料制备中, 具有易于控制构件整体性能、一体成形、工艺周期短、所需真空压力低、设备及工艺成本低、污染小等优点。但 VARI 成形工艺对树脂、碳纤维织物以及工艺的可靠性和稳定性等均提出

了较高的要求<sup>[10]</sup>。

针对 VARI 工艺, 纵观国外军民用航空型号上液态成形用树脂应用, 大多采用 RTM6 树脂, 而碳纤维织物则根据使用情况有所不同。赫氏 (Hexcel) 公司的 RTM6 环氧树脂具有较高的玻璃化转变温度和优异的湿热性能, 适用于 RTM、VARI 和 RFI 等液态成形工艺, 而 RTM6-2 是 RTM6 的改进型树脂, 不仅具有 RTM6 的性能特点, 其最大的优势是能满足远洋运输的要求。由于国内 VARI 制造工艺相对不成熟<sup>[11]</sup>, 对 VARI 工艺制备的复合材料也缺乏相关性能考核和工程应用评价研究。因此, 根据复合材料结构积木式验证方法中试样级试验表征的试验方法和试验矩阵<sup>[12]</sup>, 对 VARI 碳纤维复合材料开展多批次性能考核, 获取必要的材料性能数据, 以考核 VARI 碳纤维复合材料在国内民用飞机上使用的可行性。

收稿日期: 2017-07-18; 退修日期: 2017-07-28; 录用日期: 2017-08-17

\* 通信作者. Tel.: 029-86832934 E-mail: zhumiaowell@163.com

引用格式: ZHU Miao, GAO Lihong, LIU Gang, et al. Properties research of VARI carbon fiber composite for civil aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(10): 35-39. 朱苗, 高丽红, 刘刚, 等. 民用飞机 VARI 碳纤维复合材料性能研究 [J]. 航空科学技术, 2017, 28(10): 35-39.

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

本次 VARI 碳纤维复合材料性能研究用树脂为三个不同批次的双组份高温固化液态成形树脂 RTM6-2 (由 Hexcel 公司生产); 增强材料为 5 个不同批次带有定型剂的五综缎织物 G0926 SB 1304 TcJ InJ E01 2F (由 Hexcel 公司生产), 固化后的名义单层厚度为 0.37mm。

VARI 碳纤维复合材料的关键制造工艺参数控制按 Hexcel 公司相关技术文件中的规定执行, 其中对于双组分 RTM6-2 树脂的混合: 首先需将其 A 组分和 B 组分分别在 60℃ 或 85℃±5℃ 进行预热, 直至完全成液体状态 (最长时间不超过 24h), 再将 B 组分倒入 A 组分中, 以 3:2 (A 组分: B 组分) 的质量比充分混合, 再在 80℃ 下以 50~200r/m 的转速搅拌 30min; 然后在 120℃ 预热模具, 在真空或低压下 80℃ 左右渗透混合后的树脂, 最后在模具中先在 160℃ 固化 75min, 再在 180℃ 下后处理 120min。另外, 为了考核工艺的稳定性, 按三个或 5 个不同的固化炉批制备层合板。本次 VARI 碳纤维复合材料性能研究的其他工艺过程控制, 如预压实工艺、真空处理等, 均按中航复合材料有限责任公司的相关要求执行<sup>[6]</sup>。

### 1.2 试验方法

采用 ASTM 标准试验方法对 VARI 碳纤维复合材料的物理性能和力学性能进行测试, 具体各项试验的铺层设计和尺寸等要求均按 ASTM 标准试验方法执行, 见表 1 和表 2。

表 1 物理性能试验规划

Table 1 The test plan of laminate physical properties

试验项目	试验方法	批次 × 数量	备注
孔隙率	ASTM D 2734	3 × 7	
纤维体积含量	ASTM D 3171	3 × 7	
单层固化厚度	使用千分尺或其他精密测量设备测量层板厚度, 计算平均值	—	与密度共用试样
密度	ASTM D 792	3 × 7	任选一种方法
玻璃化转变温度 (干态)	ASTM D 7028	3 × 7	干态条件下测试
玻璃化转变温度 (湿态)	ASTM D 7028	3 × 7	在 71℃ ± 5℃ 水中浸泡 14 天后测试

注: 批次是指在包含至少三个不同的树脂和织物批次的原材料基础上, 再按三或五个不同固化炉批制成层合板。

表 2 力学性能试验规划

Table 2 The test plan of laminate mechanical properties

试验项目	试验标准	试验环境	批次 × 数量
经向拉伸强度 / 模量 / 主泊松比	ASTM D 3039	CTD	5 × 7
		RTA	5 × 7
		ETW	5 × 7
纬向拉伸强度 / 模量	ASTM D 3039	CTD	5 × 7
		RTA	5 × 7
		ETW	5 × 7
经向压缩强度 / 模量	ASTM D 6641	CTD	5 × 7
		RTA	5 × 7
		ETW	5 × 7
纬向压缩强度 / 模量	ASTM D 6641	CTD	5 × 7
		RTA	5 × 7
		ETW	5 × 7
纵横剪切强度 / 模量	ASTM D 3518	CTD	5 × 7
		RTA	5 × 7
		ETW	5 × 7
经向层间剪切强度	ASTM D 2344	CTD	5 × 7
		RTA	5 × 7
		ETW	5 × 7

表 2 中, CTD: 低温 (-55℃±3℃) 干态环境, 其中, 干态状态调节为试验前将层合板放置于实验室环境 (23℃ ± 3℃) 中 24h 以上; RTA: 室温 (23℃±3℃) 干态环境, 其中, 干态状态调节为试验前将层合板放置于实验室环境 (23℃ ± 3℃) 中 24h 以上; ETW: 高温 (130℃±3℃) 湿态环境, 其中, 层合板湿态环境条件为在 71℃±5℃ 水中浸泡 14 天。

## 2 VARI 碳纤维复合材料物理性能

三批次 VARI 碳纤维复合材料的物理性能研究结果见表 3。

表 3 三批次 VARI 碳纤维复合材料物理性能

Table 3 Three lot laminate physical properties of VARI carbon fiber composite

性能项目	平均值	离散系数 / %
孔隙率 / %	0.423	28.8
纤维体积含量 / %	56.5	0.50
单层固化厚度 / mm	0.368	1.52
密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	1.486	0.11
干态玻璃化转变温度 / °C	181	2.43
湿态玻璃化转变温度 / °C	165	2.20

从表 3 可以看出,除孔隙率离散大以外,其余性能离散均很小。虽然 VARI 碳纤维复合材料层合板的孔隙率离散系数很大,但三批次总平均值为 0.423%,这表明了虽然本次所制备的层合板批次间稳定性较差,分散性较大,但层合板内部缺陷均很小。此外,纤维体积含量达到了热压罐工艺制备复合材料的水平;实测单层固化厚度与上述名义单层固化厚度几乎一致,这也说明了本次 VARI 碳纤维复合材料的工艺控制和稳定性很好。另外,相比于干态玻璃化转变温度(181℃),湿态玻璃化转变温度有所降低,符合一般规律。

### 3 VARI 碳纤维复合材料力学性能

三种环境条件下的 5 个批次 VARI 碳纤维复合材料力学性能结果详见表 4。

表 4 5 个批次 VARI 碳纤维复合材料力学性能结果

Table 4 Five lot laminate mechanical properties result of VARI carbon fiber composite

性能项目	测试环境	基本性能	平均值	离散系数 /%
经向拉伸	室温干态	强度 /MPa	800	5.24
		模量 /GPa	62.1	3.11
		主泊松比	0.046	61.5
	-55℃干态	强度 /MPa	774	4.88
		模量 /GPa	62.5	3.16
	130℃湿态	强度 /MPa	722	5.63
模量 /GPa		57.5	3.50	
纬向拉伸	室温干态	强度 /MPa	831	3.82
		模量 /GPa	60.6	2.36
	-55℃干态	强度 /MPa	806	5.39
		模量 /GPa	63.1	2.55
	130℃湿态	强度 /MPa	767	5.68
		模量 /GPa	60.9	4.70
经向压缩	室温干态	强度 /MPa	639	8.77
		模量 /GPa	61.1	5.15
	-55℃干态	强度 /MPa	690	7.31
		模量 /GPa	60.9	3.76
	130℃湿态	强度 /MPa	430	8.94
		模量 /GPa	60.0	3.33
纬向压缩	室温干态	强度 /MPa	644	6.70
		模量 /GPa	61.8	2.70
	-55℃干态	强度 /MPa	726	9.10
		模量 /GPa	61.2	3.12
	130℃湿态	强度 /MPa	412	9.30
		模量 /GPa	59.2	3.02
纵横剪切	室温干态	强度 /MPa	110	2.41
		模量 /GPa	4.00	2.62
	-55℃干态	强度 /MPa	127	1.80
		模量 /GPa	4.86	4.36
	130℃湿态	强度 /MPa	60.0	5.86
		模量 /GPa	2.19	9.46
层间剪切	室温干态	强度 /MPa	64.1	4.01
	-55℃干态	强度 /MPa	70.2	6.90
	130℃湿态	强度 /MPa	35.9	4.25

层合板力学性能是飞机设计过程中选材和计算的主要依据之一,且为了考核在民用飞机服役中的预期环境,如温度和湿度,必须进行多种环境条件的试验。因此,对表 4 进行分析和对比可以发现:除主泊松比外,其他性能的批次稳定性较好。而主泊松比批次间离散大主要是由于织物复合材料的横向应变相对于纵向应变非常小,所以其分散性较大。低温下,基体脆性增大,纤维的断裂延伸率降低,故与室温干态相比,低温干态的拉伸强度有所降低,而其余受基体控制的力学性能则受低温影响不大,反而性能均有所升高。在高温湿态环境下,温度和湿度对大部分力学性能的影响很大,性能下降明显,这主要是由于高温下基体吸湿是一个重要的环境影响因素,水分渗透入基体会导致基体膨胀,从而对基体产生塑化或软化的作用,导致复合材料中由基体控制的力学性能在高温下会发生下降,如压缩、剪切性能等,而受纤维控制的 VARI 碳纤维复合材料的拉伸性能则受温度和湿度的影响不大。

### 4 VARI 碳纤维复合材料与热压罐复合材料力学性能对比

VARI 碳纤维复合材料与热压罐碳纤维复合材料(CYCOM970 PWC T300 ST (CCF))在室温干态条件下的部分力学性能对比如图 1 所示。

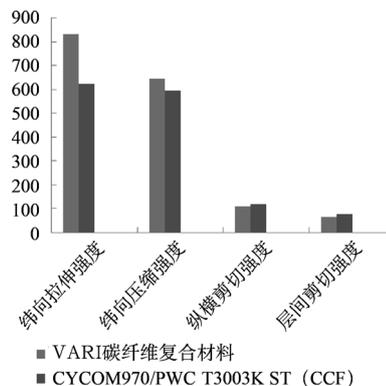


图 1 VARI 碳纤维复合材料与热压罐碳纤维复合材料部分力学性能对比

Fig.1 The comparison of sectional mechanical properties between VARI carbon fiber composite and hot pressure carbon fiber composite

从图 1 中的对比可以发现, VARI 碳纤维复合材料的纬向拉伸、纬向压缩均高于 CYCOM970 复合材料,两者的纵横剪切强度和层间剪切强度基本相当。因此,本次 VARI 成形工艺的复合材料性能基本达到了热压罐制备的复合材料的力学性能水平。

## 5 结论

作为一种低成本复合材料液体成形技术, VARI 工艺已在波音和空客客机的襟副翼等结构上得到了一定的民用航空商业化应用。而国内对低成本液体成形工艺及配套复合材料的研究仍不成熟, 且没有在国内民用航空上的应用经验。通过本次 VARI 碳纤维复合材料的性能研究, 得出以下结论:

(1) VARI 碳纤维复合材料层合板孔隙率低, 工艺控制和稳定性均良好, 纤维体积含量基本达到热压罐工艺的水平, 为后续适航符合性验证及正式生产制造提供依据。

(2) 室温干态环境下, VARI 碳纤维复合材料层合板的力学性能稍优于热压罐工艺复合材料或基本相当。高温/湿态对除拉伸以外的力学性能影响较大, 性能下降明显, 因此, 建议飞机结构设计和强度计算以及长期结构完整性评价时, 重点评估相应部件高温、高湿环境对该 VARI 碳纤维复合材料的力学性能影响。

AST

## 参考文献

- [1] 赵渠森, 赵攀峰. 真空辅助成型技术 (一) [J]. 高科技纤维与应用, 2002, 27 (3): 22-27.  
ZHAO Qusen, ZHAO Panfeng. Vacuum assisted resin infusion (1) [J]. Hi-Tech Fiber & Applications, 2002, 27 (3): 22-27. (in Chinese)
- [2] 赵渠森, 赵攀峰. 真空辅助成型技术 (二) [J]. 高科技纤维与应用, 2002, 27 (4): 21-26, 39.  
ZHAO Qusen, ZHAO Panfeng. Vacuum assisted resin infusion (2) [J]. Hi-Tech Fiber & Applications, 2002, 27 (4): 21-26, 39. (in Chinese)
- [3] 赵渠森, 赵攀峰. 真空辅助成型技术 (三) [J]. 高科技纤维与应用, 2002, 27 (5): 25-27.  
ZHAO Qusen, ZHAO Panfeng. Vacuum assisted resin infusion (3) [J]. Hi-Tech Fiber & Applications, 2002, 27 (5): 25-27. (in Chinese)
- [4] 刘强, 赵龙, 曹正华. 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 [J]. 复合材料学报, 2013, 6 (30): 90-95.  
LIU Qiang, ZHAO Long, CAO Zhenghua. Key factors on the thickness and volume fraction of fiber reinforced resin composite laminates molded via VARI technology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 6 (30): 90-95. (in Chinese)
- [5] 宋喆慧, 李延征. VARI 技术在复合材料垂尾口盖中应用研究 [C]//第 17 届全国复合材料学术会议 (复合材料制造技术与设备分论坛) 论文集, 2012.  
SONG Zhehui, LI Yanzheng. Research on VARI technology applied in composite vertical tail covering cap[C]//17th National Conference on Composite Materials (Compostie Manufacture Technology and Equipment Sub Forums), 2012. (in Chinese)
- [6] 刘强, 赵龙, 卓鹏, 等. VARI 技术在民用飞机襟翼结构上的应用研究 [J]. 航空制造技术, 2013 (22): 80-83.  
LIU Qiang, ZHAO Long, ZHUO Peng, et al. Application of VARI technology in civil aircraft wing flap structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013 (22): 80-83. (in Chinese)
- [7] 姜茂川, 赵龙, 刘强, 等. VARI 液体成形工艺制备复合材料帽形泡沫夹芯构件的工艺模拟及验证 [J]. 复合材料学报, 2013 (30): 266-272.  
JIANG Maochuan, ZHAO Long, LIU Qiang, et al. Process simulation and testing of composite cap-shaped foam core sandwich structure by VARI process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013 (30): 266-272. (in Chinese)
- [8] 赵晨辉, 张广成, 张悦周. 真空辅助树脂注射成型 (VARI) 研究进展 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2009, 204 (1): 80-84.  
ZHAO Chenhui, ZHANG Guangcheng, ZHANG Yuezhou. The development of vacuum assisted resin infusion (VARI) [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009, 204 (1): 80-84. (in Chinese)
- [9] 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 [J]. 航空制造技术, 2013 (15): 66-69.  
GAO Yanqiu, ZHAO Long, LIU Qiang, et al. High-performance VARI composites technology for aircraft structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013 (15): 66-69. (in Chinese)
- [10] 益小苏. 航空复合材料科学与技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.  
YI Xiaosu. Science & technology of the aeronautical composites[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [11] 沈真, 朱珊, 李国明, 等. 复合材料体系鉴定新方法 - 嵌套式方法 [J]. 高科技纤维与应用, 2014 (10): 9-13.  
SHEN Zhen, ZHU Shan, LI Guoming, et al. The new method

of composite system identification-nested method[J]. Hi-Tech Fiber & Applications, 2014 (10): 9-13. (in Chinese)

University, 2014: 62-95. (in Chinese) (责任编辑 朱赫)

[12] 汪海, 沈真. 复合材料手册(第一卷)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014: 62-95.

WANG Hai, SHEN Zhen, translated. Composite material handbook (Volume 1) [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong

#### 作者简介

朱苗(1985-)女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 复合材料。

Tel: 029-86832934

E-mail: zhumiaowell@163.com

## Properties Research of VARI Carbon Fiber Composite for Civil Aircraft

ZHU Miao<sup>1,\*</sup>, GAO Lihong<sup>2</sup>, LIU Gang<sup>2</sup>, LIU Qiang<sup>3</sup>, WU Yibo<sup>4</sup>

1. AVIC Xi'an Aircraft Industry (group) Company Ltd., Xi'an 710089, China

2. AVIC the First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

3. AVIC Composite Corporation Ltd., Beijing 101300, China

4. Hexcel Holdings Luxembourg S.A. R.L. Shanghai Rep. office, Shanghai 200235, China

**Abstract:** The performance verification and evaluation of carbon fiber composite fabricated by using low cost Vacuum Assisted Resin Infusion molding (VARI) process with many batches RTM6-2 resin and G0926 SB 1304 TcJ InJ E01 2F fabric were researched in this paper, which included that compare and analysis the physical of three different batch VARI carbon fiber composite and mechanical properties of five different batch VARI carbon fiber composite at different environments conditions (temperature and humidity). Obtained the basic performance data of VARI carbon fiber composite material, which is proposed for the foundation of the optimization design, optimization composite material selection, as well as technical specification to determine and material specification to establish for civil aircraft, but also provided a certain basis for its application and airworthiness compliance verification in the civil aircraft.

**Key Words:** VARI; batch; physical properties; mechanical properties; test condition; carbon fiber composite

Received: 2017-07-18; Revised: 2017-07-28; Accepted: 2017-08-17

\*Corresponding author. Tel. :029-86832934 E-mail: zhumiaowell@163.com