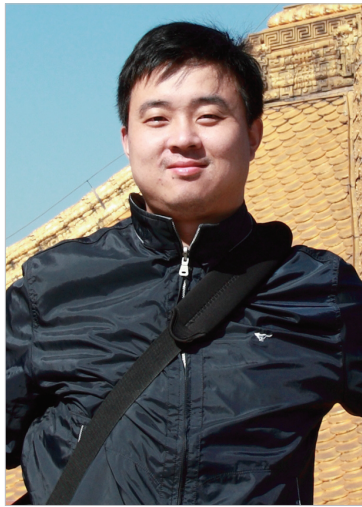


# VARI 技术在民机襟翼结构上的应用研究\*

## Application of VARI Technology in Civil Aircraft Wing Flap Structure

中航复合材料有限责任公司 刘强 赵龙 卓鹏  
中国商用飞机有限责任公司北京民用技术研究中心 陈志平 张璇



刘强  
高级工程师,主要研究方向为复合材料液体成型技术,特别是 VARI 成型技术。

在民用客机复合材料领域,中航复材联合中国商飞北京民用飞机技术研究中心针对民机复合材料襟翼开发了全新的襟翼结构,并针对大规模生产的需要开发了新型的 VARI 技术,为 VARI 技术在我国民用客机上的应用奠定了坚实的基础。

用量不但可以大幅度提高飞机安全性、经济性、舒适性和环保性,也是飞机市场竞争力的象征。以波音和空客为代表的西方航空发达国家飞机制造商已在其研制的大型民用飞机结构上普遍采用了先进复合材料,达到了设计中结构减重、制造中降低成本和使用中节能减排的目的,获得了巨大的经济利益和良好的社会效益。目前波音 787 先进轻质复合材料占全机重量的 50%,空客 A380 复合材料用量达到 25%,A350 宽体机复合材料用量预计达 52%<sup>[1-2]</sup>。

预浸料/热压罐技术是最早在航空复合材料结构上大面积推广使用的技术,具有成形质量稳定、材料

性能高、适用结构范围广等优点。但在用量不断扩大的同时,传统复合材料成型技术自身的不足也开始逐渐暴露出来,突出的问题主要表现在较高的制造成本。这是由于目前航空、航天等领域所采用的树脂基复合材料构件大多采用预浸料/热压罐成型方法,预浸料的制备及储藏、工艺过程繁多且复杂造成的辅助材料、人力和能源的大量消耗和昂贵的设备投资,势必带来复合材料构件的高成本,这在一定程度上限制了复合材料的扩大应用。

为克服传统复合材料的不足,国外率先发展了以 RTM (Resin Transfer Molding) 技术、RFI (Resin

先进轻质复合材料具有高比强度、比刚度,抗疲劳和腐蚀性能好、材料力学性能可设计、易于整体成型等优点,正在逐步成为新一代民机的主要结构材料。它在民机结构中的高

\* 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2012AA040209)资助。

Film Infusion)技术和 VARI (Vacuum Assisted Resin Infusion) 技术为代表的复合材料低成本液体成型技术。与传统的预浸料/热压罐工艺相比,液体成型工艺不需要昂贵的设备投入,省却了预浸料的制备和储藏,而且可以结合编织、缝合等手段实现复合材料结构的三维增强,从而达到结构减重和降低复合材料制造成本的目的,目前国外已将该技术广泛应用于航空结构件的制造<sup>[3-9]</sup>。

VARI 工艺即真空辅助树脂渗透工艺,其原理是将按照结构和性能要求制备好的纤维预成型体放置在模具上,在真空力作用下使液态树脂在预成型体内流动并浸润纤维,再经升温固化、冷却脱模得到能够承载的复合材料构件。VARI 工艺原理如图 1 所示。VARI 技术具有预浸料/热压罐技术所不具备的优点,主要有:

(1) 工序简单可靠,可实现大尺寸复合材料构件的一次整体成形;  
(2) 可设计性好,既可利用 NCF 等织物实现设计简单化,也可结合泡沫、蜂窝等夹芯材料实现结构的多样化;  
(3) 结构增强手段丰富,可结合缝合、Z-Pin、编织等技术实现复杂结构的整体成形和 Z 向增强;(4) 无需热压罐,制造成本低。

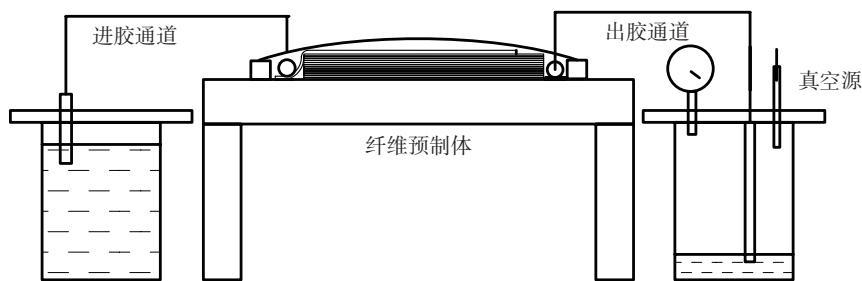


图1 VARI技术原理图

## VARI 技术在国外新型客机襟翼结构上的进展及应用

VARI 技术初期是从造船业和风电叶片制造业发展起来的,其目的是以替代传统的低效低性能的玻璃钢手糊成型复合材料工艺为主,对制

件的纤维体积含量、厚度均匀性、质量一致性要求不高。但在航空复合材料领域,对复合材料制件的纤维体积含量、力学性能,尤其是质量一致性均提出了较高的要求,因此,VARI 技术要在航空复合材料构件上实现工程化应用,还需解决以下问题。

### (1) 材料的高性能。

即开发高性能的基体树脂和增强材料,同时提高 VARI 成型复合材料的性能。具体表现在:开发配套的高性能低粘度树脂,满足 VARI 技术所需的工艺适用性要求;开发高性能的碳纤维增强织物;提高 VARI 成型复合材料的纤维体积分数,由 50% ~ 55% 提升至 55% 以上,力学性能需满足高性能航空复合材料结构的要求。

### (2) 工艺的高效率和高稳定性。

提高 VARI 成型的复合材料批次稳定性,使其能够通过严格的适航认证;同时简化生产流程,以满足大规模生产的需要。

为了实现上述目标,国外在基体树脂、增强材料及工艺多方面进行了技术革新。

### (1) 基体树脂方面。

目前,国外可用于 VARI 工艺的树脂较多,主要有乙烯基类、环氧类、

系,例如波音采用了 RTM-6 高温环氧树脂作为波音 787 机翼活动面的基体树脂。同时,绿色环保且性能更优秀的氰酸脂类及苯并恶嗪类树脂也逐渐开始进行产业化生产<sup>[10-11]</sup>。

### (2) 增强材料方面。

与预浸料/热压罐成形技术直接采用纤维丝束作为增强材料不同的是,液体成形技术通常采用编织后的织物作为增强材料。一般来说,纤维增强预成型体按照制备方法的不同可分为机织物、经编织物、针织物以及编织物等。碳纤维机织物由于其优异的可铺覆性、力学性能和可设计性,已经成为液体成形复合材料中使用量最大和使用范围最广的纤维增强预成型体材料。例如波音采用了赫氏公司 IM7 级机织物作为波音 787 机翼活动面的增强材料<sup>[10-11]</sup>。

### (3) VARI 工艺方面。

为了满足航空复合材料构件苛刻的制造要求,实现 VARI 工艺成型复合材料的高效率和高稳定性,波音公司和空客公司均对传统的 VARI 技术进行了创新,发明了可控压力树脂渗透成型技术 (Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion, 简称 CAPRI 技术) 和真空辅助成型技术 (Vacuum Assisted Processing, 简称 VAP 技术),最终实现了 VARI 技术在民用航空复合材料结构上的应用。

### · 波音公司 CAPRI 技术。

CAPRI 技术是美国波音公司于 2003 年开发的复合材料真空辅助树脂渗透专利技术<sup>[12]</sup>,其工艺原理如图 2 所示。

与传统 VARI 技术相比, CAPRI 技术进行了如下改进:对树脂的吸入和抽出过程进行了严格的参数化控制,首次提出采用可控真空度的形式进行树脂渗透,解决了传统 VARI 工艺对复合材料制件厚度控制较差的难题;增加了对纤维增强预成型体预压实的工序,使成形的复合材

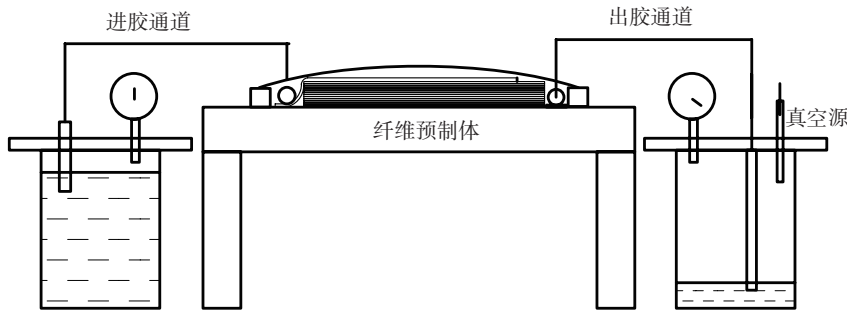


图2 CAPRI技术原理示意图

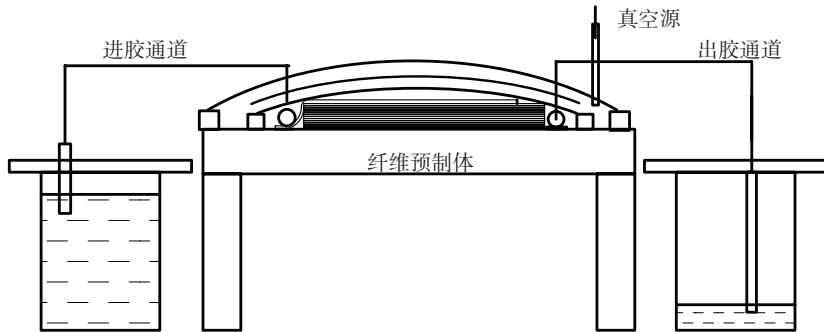


图3 VAP技术原理示意图

料制件具有较高的纤维体积含量(55%~60%),接近或达到预浸料/热压罐技术成形的复合材料制件的水平。

·空客公司VAP技术。

VAP技术是欧洲空中客车公司于2002年开发的复合材料真空辅助树脂渗透的专利技术<sup>[13]</sup>,其工艺原理如图3所示。

与传统VARI工艺相比,VAP技术进行了改进,即在预成型体与真空袋之间增加了透气但树脂无法渗透的功能层,在树脂渗透和固化升温过程中,能够将纤维预成型体内的残余气体充分排尽,可以获得更低孔隙率和更高厚度均匀性的复合材料制件。

经过技术革新,国外最终实现了将低成本的VARI技术应用在民用飞机复合材料结构。波音公司利用

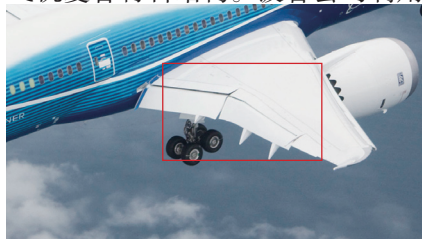


图4 用VARI技术研制的波音787机翼活动面

CAPRI技术研制了其最新型的波音787梦想客机中的复合材料机翼活动面,见图4;空客公司也采用VAP技术研制了其空中巨无霸机型A380的复合材料襟翼。通过国外大型民用客机企业在其最新型客机上采用VARI技术,证明VARI技术已具备在结构相对简单、受力较小的民机复合材料部件进行大规模应用的条件。

## VARI 技术在国内民机襟翼结构上的进展及应用

由北京航空制造工程研究所和北京航空材料研究院的复合材料专业整合而成的中航复材有限责任公司(以下简称中航复材)是国内率先开展低成本液体成型技术研究机构,具有国内领先的液体成型技术基础,在适用于复合材料液体成型的工艺技术开发、液体成型工艺树脂流动控制、计算机模拟以及液体成型模具设计技术等方面进行了大量的研究工作,开发的中温环氧树脂体系BA9912、3228,高温环氧树脂体系BA9914、5228,以及苯并恶嗪树脂体系5284,其工艺性及其复

合材料力学性能均达到了国外同类产品的水平<sup>[14]</sup>,采用VARI工艺研制的航空典型结构件已在多个项目中进行了验证和应用。其中,中航复材采用VARI技术整体成型了尺寸长达3000mm×4000mm×1200mm的船体结构试验件和尺寸为4500mm×1200mm×200mm的无人机机翼盒段典型件是国内目前较大型的采用非热压罐技术研制的大型液体成型复合材料构件。此外,中航复材还采用VARI技术研制了4000mm×450mm×60mm的泡沫夹芯/缝合多肋整体壁板(图5),该结构是国内首次进行装机验证并顺利通过静力试验和飞行验证的航空复合材料构件。

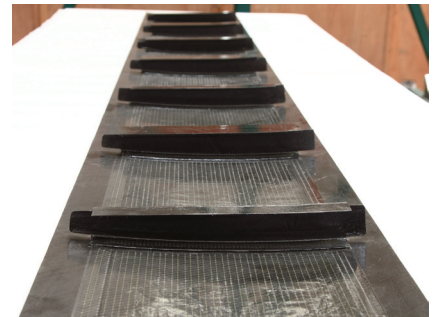


图5 采用VARI技术成型的泡沫夹芯/缝合多肋整体壁板

在民用客机复合材料领域,中航复材联合中国商飞北京民用飞机技术研究中心针对民机复合材料襟翼开发了全新的襟翼结构,并针对大规模生产的需要开发了新型的VARI技术,为VARI技术在我国民用客机上的应用奠定了坚实的基础。

### 1 新型襟翼结构

常规的襟翼结构通常设计为密肋结构或全高度蜂窝/泡沫夹芯结构,新型襟翼结构设计为疏肋+加强筋的结合形式,该种襟翼结构相比常规结构,具有更低的结构重量和更高的传载效率。襟翼结构典型件截取了全尺寸襟翼的局部进行验证,结构尺寸为1018mm×516mm×100mm(图6)。

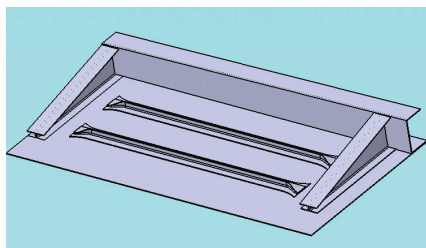


图6 新型襟翼结构典型件

## 2 新型高效低成本的 HFVI 技术

中航复材基于传统 VARI 工艺开发了一种新型高效的高纤维体积分数真空转移成型技术(High Fiber-volume Vacuum Infusion, HFVI),该技术改变了传统 VARI 技术仅仅依靠出胶通道作为点真空源的形式,通过树脂缓冲技术和真空导气技术取消了出胶通道,不但大幅降低了树脂用量同时可实现树脂用量的可控;同时采用了多种工艺措施确保纤维预制体在工艺全程中充分压实,成型复合材料纤维体积分数和厚度均匀性较传统的 VARI 技术有较大提升。该技术具有良好的工艺适用性和可靠性,已达到工程化应用的技术水平,成型后的复合材料的纤维体积分数和厚度均匀性接近预浸料/热压罐的工艺水平。

HFVI 工艺相比传统 VARI 工艺,突破了以下关键技术:(1)高纤维体积分数技术,制件具有更高的纤维体积分数(可达 56% 以上)和更佳的厚度均匀性(可满足  $\pm 6\%$  的公差要求),同时也具有更高的力学性能;(2)树脂用量控制技术,取消了树脂出胶通道,制造成本更低;(3)表面质量控制技术,通过在树脂媒介与预

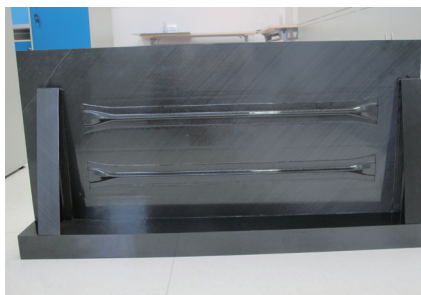


图7 采用HFVI技术研制的民机襟翼典型结构件

制体之间铺设柔性隔离层,使成型的制件具有更高的表面质量。

中航复材针对新型民机襟翼结构,进行了树脂流动模拟分析、模具优化设计及成型工艺研究,最终采用 HFVI 技术整体成型了民机襟翼典型结构,见图 7。

## 3 成型结果及分析

采用 HFVI 技术研制的民机襟翼结构典型件的检测结果如下:

(1)外观质量。采用 HFVI 研制的典型件外表光滑无褶皱,无贫胶、干斑缺陷。

(2)内部质量。采用 FCC-B-1 型超声检测仪按 GJB1038.1a-2004 标准要求对典型件进行全覆盖无损检测,未在典型件内部发现缺陷。

(3)厚度。采用厚度 CL400 超声测厚仪对典型件进行厚度测量,测量结果见表 1。

(4)工艺成本与对比。HFVI 与 VARI 工艺成本的比较见表 2。

综上,采用 HFVI 技术研制的襟翼结构典型件,外表光滑无褶皱,内部质量稳定,厚度均匀性良好,满足航空复合材料构件的要求;相对比传统的 VARI 工艺, HFVI 工艺简化了工艺流程,显著降低了树脂、树脂管道和清洗溶剂的用量,取消了出胶系统,具有更高效、更低成本的特点。

表1 襟翼典型件厚度分区测量结果

区域	理论厚度/mm	公差范围/%	实测值/mm	实测厚度偏差/%
壁板区	1.92	$\pm 6$	1.90 ~ 2.01	-1.04 ~ 4.69
“工”型肋翻边	1.92	$\pm 6$	1.91 ~ 2.00	-0.52 ~ 4.17
“工”型肋腹板	2.56	$\pm 6$	2.52 ~ 2.66	-1.56 ~ 3.91
“C”型梁	2.56	$\pm 6$	2.53 ~ 2.69	-1.17 ~ 5.08

表2 HFVI工艺与VARI工艺成本对比

对比项	VARI 工艺	HFVI 工艺
树脂用量/kg	7	4.8
树脂管道/m	20	10
出胶系统	有	无
清洗溶剂用量/L	6	4

## 结 论

(1) VARI 技术作为一种低成本的复合材料液体成型技术已在波音 787 及 A380 等襟副翼结构上得到实质性的商业化应用;

(2) HFVI 技术作为一种改进的 VARI 技术具备高效、高性能、低成本和树脂用量可控等优点;

(3) 采用 HFVI 技术研制的新型襟翼结构典型件内、外部质量均满足航空复合材料构件的性能要求;

(4) HFVI 技术具备在我国民用飞机襟翼结构上进行推广应用的条件。

## 参 考 文 献

- [1] Niggemann C, Song Y S, Gillespie J W, et al. Experimental investigation of the controlled atmospheric pressure resin infusion (CAPRI) process. *Journal of Composite Materials*, 2008, 42(11): 1049-1061.
- [2] Tsotsis T K. Interlayer toughening of composite materials. *Polymer Composites*, 2009, 30(1): 70-86.
- [3] 刘强, 高艳秋, 赵龙, 等. 缝合加筋壁板 VARI 整体成型工艺研究 // 第十七届全国复合材料学术会议论文集, 2012.

本文共有参考文献 14 篇, 因篇幅所限, 未能一一列出, 如有需要, 请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)