

# 面向航空结构的高性能 VARI 复合材料技术

## High-Performance VARI Composites Technology for Aircraft Structure

中航复合材料有限责任公司 高艳秋 赵 龙 刘 强 黄 峰



高艳秋

中航复合材料有限责任公司技术发展部高级工程师,长期从事高性能树脂基复合材料制造技术研究,负责、参与多个国家重点型号攻关以及国防预研任务,多次获奖,申请专利十余项。

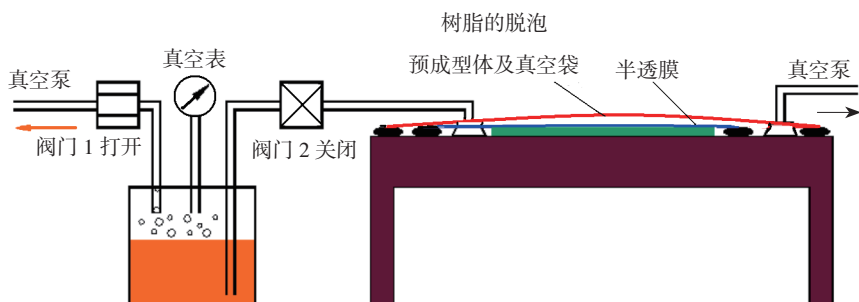
目前, VARI 复合材料已在多个航空结构上进行了验证和应用,随着验证工作的不断深入, VARI 技术必将成为继预浸料 / 热压罐工艺之后又一可工程化应用的复合材料制造技术。

料的制备和低温储藏、繁杂工艺过程以及价格昂贵的热压罐等设备投资势必造成复合材料的高成本,这在一定程度上又限制了复合材料用量的进一步扩大。

VARI ( Vacuum Assistant Resin Infusion ) 即真空辅助树脂渗透是近年来发展起来的一种复合材料低成本制造技术,其工艺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,在一个真空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,如图 1 所示。VARI 工艺的最大特点是全工艺过程都是在一个真空条件下完成的,不需要施加额外的压力,因此不需要热压罐,不仅省却了热压罐及配套设备的投入,而且所成型零件的尺寸不受热压罐尺寸的限制,尤其适用

树脂基复合材料因其具有比强度高、比刚度大和可设计性好等优点已成为航空航天等领域广泛采用的最主要的结构材料之一。但随着用量的不断增加,传统树脂基复合材料自身的弱点也不断暴露出来,突出表现在传统树脂基复合材料的制造成本较高,这主要是由于传统复合材料大多采用预浸料 / 热压罐成型,预浸



真空辅助渗透成型 (VARI)

图1 VARI成型工艺原理图

于超大尺寸复合材料零件成型。同时可以结合缝合、编织等三维增强手段实现复杂构件的整体成型,从而减少零件和紧固件数量,降低了紧固件和装配成本。但 VARI 工艺自身的特点决定了所成型零件的纤维体积含量(一般在 50% 以下)与预浸料/热压罐工艺存在差距,要实现在飞机结构上的应用必须对传统的 VARI 工艺进行改进。

### 国外 VARI 技术应用情况

国外 VARI 技术最初应用在舰船领域,因其在降低复合材料制造成本及大型构件整体成型方面具有的优势,近年来相关的研究机构对 VARI 技术在航空航天复合材料结构上应用的可行性方面已做了大量的研究工作。

洛克希德·马丁公司是最早将 VARI 技术应用于飞机结构的研究机构,采用 VARI 技术成型整体复合材料座舱,51 个零件通过 VARI 工艺共固化成为一个整体结构,有效地提高了结构的整体性,减少紧固件 400 个,在保证减重效率不变的情况下,成本降低 38% 以上。该公司还与海军 IPT 公司合作,采用 VARI 工艺制造 P-3 飞机的下翼面整流复合材料壁板,并且计划将 VARI 工艺扩大应用到其它零件上。此外,洛克希德·马丁公司为加速 VARI 低成本技术在大型飞机上的应用,目前已经着手在 C-5、C-130 等机型上开展 VARI 工艺的试验及验证工作<sup>[1]</sup>。

在由美国航空航天局(NASA)资助的“波音预成型体”计划中,V System Composites 公司采用 VARI 工艺对复合材料机翼结构及带加强筋机身整体复合材料夹层结构的成型进行了验证,整个加强筋壁板结构在一个注射过程中完成。另外,波音公司还将 VARI 技术用于 CH-47 部分零件的制造。美国 Seaman 公司实施的“希曼”计划,其主要目的之一

是采用 VARI 工艺在一个注射过程中完成半个机身的整体制造。与波音公司合并的麦道公司放弃了采用预浸料热压罐成型工艺制造机翼蒙皮的方法,转入采用 VARI 工艺制造大型机翼蒙皮的研究。

VARI 工艺在其他国防领域也得到应用。洛克希德·马丁公司在制造“三叉戟”IID5 弹道导弹仪器舱段的复合材料构件时,为降低成本,对预浸料热压罐成型工艺、低温预浸料工艺及 VARI 工艺等的制造成本及复合材料制件力学性能进行综合评估,最终选用 VARI 成型工艺制造了弹道导弹仪器舱段,实现了一次整体成型。与预浸料热压罐工艺相比:零件总数由 61 减少到 1,紧固件减少 376 个,力学性能及减重效果相同(制件纤维体积含量达 58.6%),成本降低 75%。

German Aerospace Center 采用树脂渗透的方法,完成了全尺寸 ROHACELL 泡沫夹芯复合材料前机身的研制。

最具代表性的是欧洲防务公司于 2007 年研制成功的 A400M 运输机的货舱门(如图 2 所示)该舱门尺寸约 7m × 4m,位于机身的密封舱部分,因其要承受较大的气密载荷,对构件的质量要求很高,加筋壁板和横向隔框采用复合材料设计,加筋壁板没有采用传统的复合材料成型方法,而是先将蒙皮和长桁预制成为干态纤维预成型体,通过 VARI 工艺使



图2 A400M运输机的货舱门

树脂在真空作用下渗透到蒙皮和长桁的各个区域,然后在烘箱中固化成型。与传统成型方法相比,没有使用昂贵的热压罐,成本低;同时,由于采用 VARI 技术将内部数根长桁与外蒙皮整体固化,零件数量减少,不仅结构整体性高,且能节省约 3000 个装配工时,成型效率高;此外通过结构优化设计,A400M 的货舱门减重效益也非常明显。

图 3 则是 A380 采用 VARI 技术成型的副翼结构<sup>[2]</sup>。



图3 VARI成型的A380副翼结构

### 国内 VARI 技术研究进展及应用情况

鉴于 VARI 技术在降低复合材料制造成本方面具有的优势,国内自本世纪初开始已有多家研究机构开展了 VARI 技术研究。中航工业北京航空制造工程研究所是国内最早开展 VARI 技术和应用的科研机构之一,在专用树脂体系开发、干态纤维增强预成型体渗透特性、VARI 工艺树脂流动控制以及成型工艺等方面均开展了大量的研究工作,开发了 BA9911、BA9912 和 BA9914 VARI 树脂体系,突破了复杂构型预成型体制备、高纤维含量 VARI 工艺树脂流动控制及 VARI 工艺等关键技术,研制的航空典型结构件的纤维体积含量达到了

58%以上,并在多个项目上进行了试验验证和装机应用。

### 1 VARI 专用树脂体系方面

#### (1) BA9912 环氧树脂。

BA9912 是中航工业北京航空制造工程研究所自主研发的 120℃固化的环氧树脂体系,该树脂的室温粘度只有 120mPa·s,可以满足 VARI 工艺对基体树脂低粘度的要求。

BA9912 复合材料的固化温度为 120℃,  $T_g$  为 187℃,82℃时模量保持率达到 88%,满足使用温度 82℃的航空复合材料结构要求。目前该材料体系已在机翼、副翼和舱门结构上进行验证和应用<sup>[3]</sup>。

#### (2) BA9914 环氧树脂。

BA9914 是中航工业北京航空制造工程研究所自主研发的 180℃固化的环氧树脂体系,该树脂 60℃下的粘度为 110mPa·s,最低粘度 30mPa·s,能够满足 VARI 工艺低粘度要求。BA9914 在成型过程中有较长的操作期,可以成型大型构件。

BA9914 复合材料经标准规范固化后  $T_g$  为 251℃,具有较好的耐热性,能够满足 133℃的使用要求<sup>[4]</sup>。

### 2 VARI 成型工艺方面

对于航空复合材料结构件来说,一般要求复合材料的纤维体积含量在 55%以上。由于传统的 VARI 工艺是在一个真空压力条件下成型,不足以使纤维预成型体达到理想的密实状态,所成型的 VARI 复合材料的纤维含量往往偏低,这是制约 VARI 技术在航空结构上应用的关键。

为满足航空复合材料的性能要求,开展了高性能 VARI 成型工艺研究,通过采用优化树脂流道设计、调整树脂进/出管路压力等手段,使 VARI 复合材料制件的纤维体积含量得到改善,表 1 为采用 VARI 工艺改进前后的纤维体积含量对比。

按两种情况进行对比分析,① VARI 工艺改进前、后的 U3160/BA9912 复合材料的纤维体积含量

表1 VARI工艺改进前后成型的U3160/BA9912和U3160/BA9914试验件厚度及纤维体积含量试验结果

试验件铺层	改进前 U3160/BA9912		改进后 U3160/BA9912		改进后 U3160/BA9914	
	单层厚度/mm	体积含量/%	单层厚度/mm	体积含量/%	单层厚度/mm	体积含量/%
(0)7	0.161	56.47	0.150	60.61	0.147	61.84
(90)14	0.160	56.82	0.148	61.43	0.148	61.43
(0)14	0.165	55.10	0.152	59.81	0.151	60.20
(90)14	0.159	57.18	0.149	61.01	0.148	61.43
(0)14	0.165	55.10	0.148	61.43	0.146	62.27
(0)20	0.160	56.82	0.150	60.61	0.152	59.81
单向层合板平均值	0.162	56.23	0.150	60.81	0.149	61.15
(±45)3s	0.167	54.44	0.156	58.28	0.153	59.42
(45/0/~45/90)2s	0.169	53.79	0.151	60.20	0.150	60.61
(45/0/~45/90)2s	0.172	52.85	0.155	58.65	0.154	59.03
(45/0/~45/90)2s	0.175	51.95	0.153	59.42	0.152	59.81
(45/0/~45/90)3s	0.173	52.55	0.156	58.28	0.151	60.20
多向层合板平均值	0.171	53.10	0.154	58.96	0.152	59.81

情况;② VARI 工艺改进后 U3160/BA9912、U3160/BA9914 两种材料体系纤维含量情况。按单向层压板和多向层合板分类,将测得的纤维含

量结果取平均值,两种情况对比结果分别见图 4 和图 5。可以看出,经工艺改进后成型的 U3160/BA9912、U3160/BA9914 复合材料纤维含量基

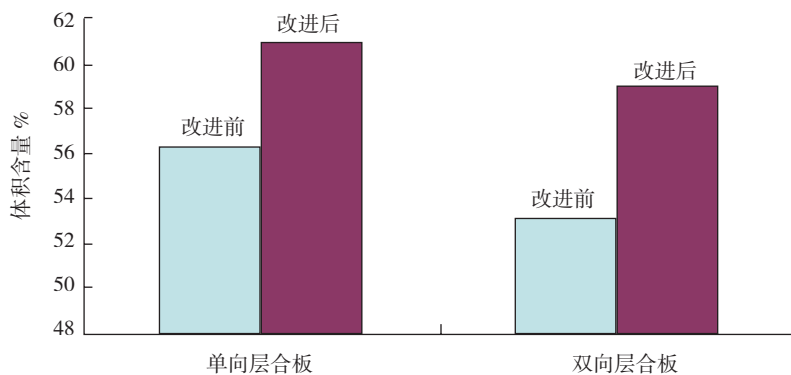


图4 VARI工艺改进后U3160/BA9912和U3160/BA9914复合材料纤维体积含量对比

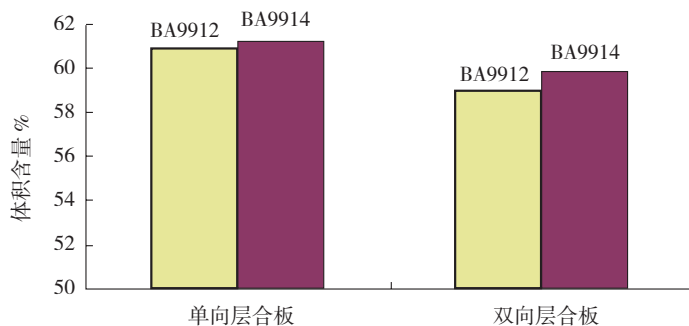


图5 VARI工艺改进前、后U3160/BA9912复合材料纤维体积含量对比

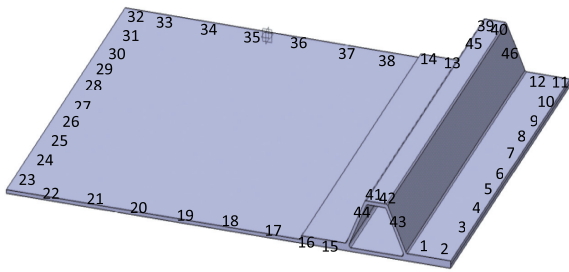


图6 帽形加筋壁板厚度测试点分布图

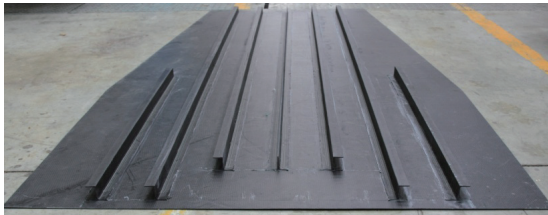


图7 加筋壁板典型件

本接近,达到 58% 以上的纤维体积含量。采用改进 VARI 工艺成型的 U3160/BA9912 复合材料比改进前约提高 5% 左右。

采用 BA9914 成型的帽型加筋壁板及大尺寸加筋壁板典型件,进一步验证了 VARI 工艺改进后对提高 VARI 复合材料纤维含量的可行性。图 6 是帽形加筋壁板厚度测试点分布图,测试结果见表 2。

表2 帽形加筋壁板厚度测试结果及纤维体积含量

测试点	部位	理论厚度 / mm	实际厚度 / mm	单层厚度 / mm	纤维体积含量 / %
1#~16#	蒙皮 + 筋(缝合)	4.80	4.65	0.155	58.65
17#~38#	蒙皮(不缝)	3.20	2.94	0.147	61.84
39#~46#	帽形筋(不缝)	1.60	1.49	0.149	61.01
平均纤维体积含量 / %					60.5

表3 加筋壁板典型件厚度测试结果及纤维体积含量

测试点	部位	理论厚度 / mm	实际厚度 / mm	单层厚度 / mm	纤维体积含量 / %
周边加厚区	蒙皮周边	2.555	2.503	0.147	61.84
与横隔板配合区	中段蒙皮厚区	2.245	2.258	0.151	60.20
两侧局部厚区	两侧加厚区	3.485	3.455	0.150	60.61
蒙皮薄区	中段蒙皮薄区	1.935	1.938	0.149	61.01
平均纤维体积含量 / %					60.92

图 7 为加筋壁板典型件,采用 BA9914 按 VARI 工艺成型,利用复合材料的可设计性,最大限度的实现结构减重,根据受载情况蒙皮设计为变厚度,被纵向加筋和横向装配区分为几十个区域,归纳为 4 种厚度,其厚度测试结果及纤维含量见表 3。

将高性能 VARI 成型技术应用于 U3160/BA9914 复合材料力学性能试验件的研制、帽型加筋壁板典型件以及大尺寸加筋

壁板典型件研制,图 8 测试数据显示 VARI 成型复合材料板件及结构件纤维体积含量均达到 58% 以上。

## 结论

尽管国内 VARI 技术的研究起步较晚,但经过近十几年的研究,从专用 VARI 树脂体系开发、复杂构型预成型体制备、VARI 工艺树脂流动控制到 VARI 成型工艺均已取得突破性进展,VARI 制件的纤维体积含量可以达到 58% 以上,已接近热压罐工艺水平。目前,VARI 复合材料已在多个航空结构上进行了验证和应用,随着验证工作的不断深入,VARI 技术必将成为继预浸料/热压

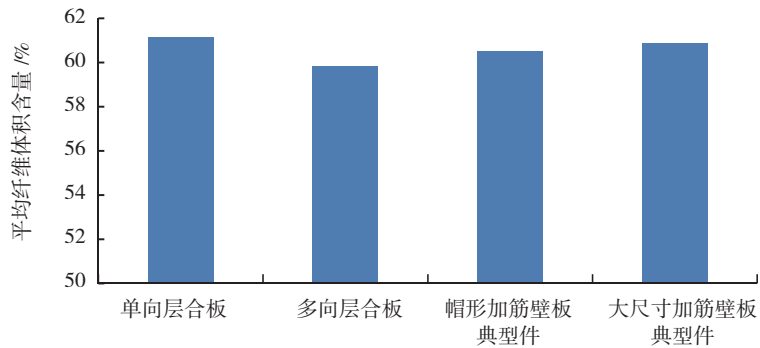


图8 以U3160为增强体的试验件及两种典型件平均纤维体积含量

罐工艺之后又一可工程化应用的复合材料制造技术。

## 参考文献

- [1] Dienhart R W, Bitzes M, Tyahla T. Design and test of full. Scall Vartm Integrally Stiffened Cai Cockpit Tub, 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structure, Structural Dynamics & Materials Confer, 2004: 19-22.
- [2] Heider D, Gillespie J W, jr. VARTM variability and substantiation. United States, 2005.
- [3] 李小兵,孙占红,曹正华.真空辅助树脂灌注配套基体树脂的制备及性能.热固性树脂,2006,2(1): 4-7.
- [4] 王新庆,孙占红,刘强,等. BA9914 耐高温 VARI 成型树脂性能研究,第 17 届全国复合材料学术会议论文集,2012.

(责编 深蓝)