

树脂基碳纤维复合材料 成型工艺现状及发展方向

Current Status and Development Trend of Epoxy Resin Carbon Fiber Reinforced Composites Forming Process

西北工业大学 蔡闻峰 周惠群 于凤丽



蔡闻峰

2006年毕业于西北工业大学航空宇航制造工程专业,获工学硕士学位。现任西北工业大学无人机研究所工程师,主要从事小型无人机制造工艺技术研究,曾主持过多个型号无人机的工艺工作。主要研究方向为飞机装配理论与技术、复合材料结构制造、计算机辅助技术、检测技术等。发表论文10余篇。

现代飞机复合材料构件制造技术正向着以共固化/共胶接为核心的大型整体复合材料结构件为对象,以低成本为目的,以自动化和数字化制造技术相结合为手段的方向发展。为保证我国大飞机研制项目的顺利

现代飞机复合材料构件制造技术正向着以共固化/共胶接为核心的大型整体复合材料结构件为对象,以低成本为目的,以自动化和数字化制造技术相结合为手段的方向发展。

实施,精化传统复合材料制造模式,进行现代复合材料飞机构件制造技术的研究与扩大应用是十分必要的。

与金属材料相比,高性能纤维复合材料成本高,所以必须在纤维复合材料结构件制造过程中广泛实现自动化和数字化相结合的现代复合材料制造技术,以达到降低飞机全寿命周期内成本的目的。

国外飞机碳纤维复合材料制造技术现状

1 复合材料用量大幅提高

目前,国外新一代军机和民用运输机已普遍采用高性能树脂基碳纤维复合材料,第四代战机复合材料用量占飞机结构重量的20%~50%,干线客机约为10%~50%。

以波音777为例,在其机体结构中,铝合金占70%、钢11%、钛7%,复合材料仅占到11%,而且复合材料主要用于飞机辅件。但到波音787时,复合材料的使用出现了质的飞跃,其

用量已占到结构重量的50%,不仅数量激增,而且已用于飞机的主承力构件。

2 构件集成化、整体化、大型化

复合材料是大型整体化结构的理想材料,与常规材料相比可使飞机减重15%~30%,结构设计成本降低15%~30%,制造成本大幅降低。复合材料还克服了金属材料容易出现疲劳和被腐蚀的缺点,增加了飞机的耐用性,改善了飞机的维修性,同时也带来了飞机客舱的舒适性。

美国CAI计划将复合材料结构整体成型技术列为其最主要的关键技术之一,并于2001年开始用于F-35(JSF)的验证上。

在波音787之前,飞机的机身段由约2500个配件、3万个螺钉组装起来,现在通过采用集成化的整体机身结构,使生产方式更简单、更可靠,且显著减少了零件数目,减重约达20%。

3 制造设备大型化

PARLEC
Measurably Better

Your total machining solution!



帕莱克镗刀系统

性能卓越，效率倍增！

- 精密的模块化设计，小孔极具优势！
- 标准镗孔范围是2mm到556mm，调节精度最小为2μm
- 刃刃可调镗刀的效率可达传统镗刀的4倍
- 使用ISO/ANSI标准刀片，降低库存和生产成本

★ North America

★ Asia

★ Europe



美国帕莱克公司是刀具及刀具预调仪设计与制造的世界领航者，随着国内公司规模的不扩大，

现**诚邀销售工程师加盟**：

1. 机械相关专业本科以上学历
2. 具有2年以上的机械行业经验
3. 工作地点：南京，天津，成都，武汉

请将个人简历发Email至：hr.parlec@163.com

帕莱克机械（南京）有限公司

全国办事处：上海，广州，天津，成都，武汉

电话：025-66612228 传真：025-66612278

Email: sales@parlec.com.cn

www.parlec.com



在复合材料制造设备上，国外民机广泛采用了高效的双头铺带机、自动铺放设备、大型热压罐及超声检测设备等，为高速生产机体结构提供了保障。

ASC 工艺系统公司已制造出用于波音 787 复合材料机身段固化的、世界上最大的热压罐。该热压罐最大压力 1.02MPa，最高温度 232℃，作业区面积 9m × 23m，容积 2214m³，重量 500t 以上。

Flow International 公司制造了超大型喷水切割机，用于长达 30m 的波音 787 全复合材料结构机翼蒙皮层合板的切割，床身为 36m × 6.5m。该磨粒喷水切割机可快速、高效切割厚的层合板，且不产生过热问题。

4 复合材料下料、铺放、切割实现自动化和数字化

由 Dassault Aviation 公司同 BAE 体系公司联合设计的商用喷气式飞机机身采用浸渍树脂的碳纤维窄带和蜂窝芯材制造。该机身每节段尺寸为 4.5m × 2m，机身全部采用圆桶式复合材料 (FUBACOMP) 方案。

B787 飞机加工中生产出的第一个全尺寸复合材料整体结构机身段的尺寸为 7m × 6m。这一包括桁条在内的整体结构是在一副用殷伐钢制成的大型芯轴中制作的，芯轴上安装有加强筋的 W 形模腔，加强筋在纤维铺放前被安放在模腔中，应用计算机控制的复合材料铺带机完成纤维铺放。模具被安装在一个旋转机构上，随着铺带过程的进行，该机构带动筒型件旋转，然后该构件被包裹并放入热压罐中进行共固化，形成带加强筋的壳体结构。

5 低成本制造技术广泛应用

由于复合材料的成本较高，特别是制造成本，这是制约它进一步扩大应用的主要障碍之一。以美国为首的西方发达国家纷纷制订低成本复合材料发展研究计划，不断完善复合材料层压板真空袋-热压罐制造工艺，开发高性能、低成本的复合材料制造技术，并已取得较大进展。如自动化的铺带机 (ATL)、纤维铺放机、树脂转移模塑成型 (RTM)、真空辅助模塑成型 (VARTM)、树脂膜熔渗 (RFI)、电子束固化及膜片成型等先进技术。

RTM 技术不使用预浸料和热压罐，可以有效地降低成本，配套使用三维编织机和三维缝纫机，可以制造较为复杂的零件。RTM 技术在美国的 F-22 和 F-35 上得到了广泛应用。波音 787 机身的大部分地板采用 RFI 制造。波音 787 机翼后缘由德哈维兰公司采用 VARTM 工艺制造，与传统的热压罐技术相比，结构更坚固，易于修理，不易损伤。

国内飞机碳纤维复合材料 制造技术现状

我国复合材料制造技术经过 30 多年的研究和发展，已形成了一定的规模，达到了一定的水平。各主机生产厂均已建设了生产手段，完成了相应的设备改造和技术改造。各研究院所及重点高校培养了大量人才。国内从设计、材料到工艺有了一支配套的研发队伍。但与国外相比，还存在应用规模和水平、材料基础、制



在数控机床上加工波音复合材料构件

造工艺、设计方法与手段严重落后等问题,且差距有进一步拉开的趋势。

1 复合材料用量不高

当波音、空客等新机大规模采用复合材料后,我国目前仅掌握金属飞机的研制能力,复合材料只能少量地用在飞机辅件上,在主结构上的应用还需进一步研究。

国内 1985 年制成的歼 8、强 5 机垂直尾翼壁板及垂直尾翼使用过树脂基碳纤维复合材料。国产客机、运输机主、次承力构件没有使用复合材料的相关报道。国内直升机领域复合材料使用比例较大,直九复合材料使用率达到了 23% 左右。国内无人机因尺寸较小,复合材料用量较大,一般在 50% ~ 80% 之间,如爱生系列无人机。

2 碳纤维依赖进口,国产化程度低

我国自 20 世纪 60 年代开始碳纤维研究开发,至今已有近 40 年的历史,但进展缓慢,无论军用、民用碳纤维均不能自给,同时由于发达国家对我国几十年的技术封锁,至今没能实现大规模工业化生产,仅有的生产厂家还面临国际的竞争和挤压,举步维艰。尤其是像 T800 这样被广泛应用于飞机制造的复合材料,我国还不能生产。国产化的 T300 复合材料还在研制之中。工业及民用领域

的需求长期依赖进口,严重影响了我国高端技术的发展,尤其制约了航空航天及国防军工事业的发展,与我国的社会发展进程极不相称。

3 制造设备尺寸小且多数依赖进口

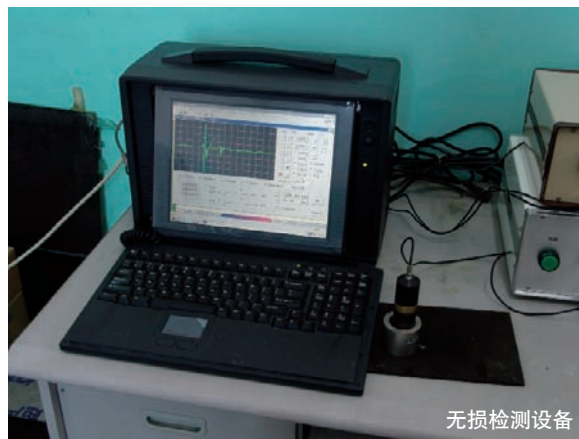
国内用于复合材料生产的主要关键设备与我国要开展的大飞机结构尺寸相比,设备尺寸小,且大多数依赖进口。

如西飞用于飞机复合材料制造的主要设备热压罐是从德国 Scotch 公司引进的 $\phi 3.5\text{m} \times 10\text{m}$ 热压罐,有效长度为 10m,直径为 3.5m,与欧美等国家相比,差距仍然较大。

哈飞用于先进复合材料生产的主要设备,如固化炉、大型热压罐、复合材料数控下料铣、激光铺层定位系统、自动铺带机、RTM 成型设备、缝合设备以及先进的无损检测设备等基本上是从国外进口的。

4 工艺落后,自动化和数字化水平低

以树脂基碳纤维复合材料飞机结构件为例。传统的生产工艺采用预浸料铺层干法成型工艺,在热压罐或烘箱中加热、加压固化成型机体复合材料构件。固化、脱模、修整后的构件经无损检测验证合格后进入下道装配工序。



复合材料零件修整过程中打磨和切割裁边时产生的固体粉尘,固体边角料;胶接过程产生的废气等;这些因素都增加了产品的制造成本,并对环境造成了破坏。

自动铺带机、自动丝束铺放机、柔性数控气动卡具的出现部分解决了手工铺放质量不易控制的缺点。不过,到目前为止,仍不能完全采用自动化设备来替代手工铺放。同时,热压罐法成型生产周期长,设备费用高,能源消耗大,成本高,由于复合材料零件的整体尺寸越来越大,所需的热压罐尺寸跟着加大,成本问题也随之突出。

综上所述,我国树脂基碳纤维复合材料制造存在着原材料和制品的成本昂贵、制品成型工艺陈旧、复合材料回收再利用困难等问题亟待研究解决。

结论与建议

1 建立适合国情的复合材料研发模式

与欧美国家相比,我国复合材料制造技术各方面都存在较大差距,主要原因是我国科技转化为生产力的水平较低。与欧美航空工业相比,我国航空企业还没有成为真正的科技转化生产力的主体,科技转化为生产力体制、机制的最佳模式还没有形成。为此,需建立复合材料发展战略,有组织、有规划地进行研究和创新,同时应加大对相关企业的投入,完善科研机制,实行设计制造一体化,提高飞机研制的频度,建立科技转化生产力体制、机制的航空工业最佳模式。

2 实现高性能、高质量碳纤维国产化

随着我国经济的快速发展,碳纤维的需求与日俱增,虽然国际上一些公司的 T300 级原丝和碳纤维产品

PARLEC
Measurably Better

Your total machining solution!



帕莱克刀柄系统

——专业设计，精密制造！

■ 同心度
在3倍直径处小于 $3\mu\text{m}$

■ 动平衡
获得专利的可调平衡系统

■ 高精度
刀柄锥度达到AT3标准
 $2.5\mu\text{m}$ 的公差

□ 高速加工的动平衡热缩式刀柄，ER弹簧夹头刀柄，强力铣刀柄和侧固式刀柄，刀柄规格有BT，DIN，HSK，CAT，Chiron和Morse锥度

□ 帕莱克标准ER弹簧夹套螺母夹持力比其他标准螺母大3倍

★ North America

★ Asia

★ Europe

美国帕莱克公司是刀具及刀具预调仪设计与制造的世界领导者。随着国内公司规模的不扩大，现**诚邀销售工程师加盟**：

1. 机械相关专业本科以上学历
2. 具有2年以上的机械行业经验
3. 工作地点：沈阳、西安

请将个人简历发Email至：hr.parlec@163.com

帕莱克机械（南京）有限公司

全国办事处：上海、广州、天津、成都、武汉
电话：025-66612228 传真：025-66612278

Email: sales@parlec.com.cn

www.parlec.com



开始对我国解冻，但碳纤维及其复合材料的生产是关系到国防建设的高科技，必须立足国内。所以，需要加大国家投入和攻关，或通过技术引进，尽快掌握核心技术，降低生产成本，研制生产高性能、高质量的碳纤维，以满足军工和民用产品的需求，扭转大量进口的局面，这是我国碳纤维工业发展亟待解决的问题。

3 大力发展低成本制造技术

低成本复合材料制造技术是当今世界上复合材料技术领域的核心问题之一，包括低成本的材料技术、低成本的设计技术和低成本的制造技术，如大型整体成型结构、共固化/共胶接结构、设计制造一体化技术等，其中，重点应是以共固化/共胶接为核心的大面积整体成型技术。我们应当向国际上倡导的“无紧固件”技术靠拢，减少后加工量和装配工作量。

国内亟需在这几方面制订好规划，有组织地统一制订相应规范，使试验和分析更好地结合起来，形成设计和鉴定的统一指南，编制全行业的技术标准，改进最终产品的一致性，降低成本，减小风险，以满足飞机研制的需要。

4 发展研究创新的制造工艺技术

国外复合材料在飞机上的广泛应用得益于制造设备和工艺技术的发展和成熟。因此，国内要注意规划发展机械化、自动化制造技术（如自动铺带技术、自动纤维铺放技术等），并提高生产设备的柔性，以提高复合材料构件的生产率。注意借鉴其他领域的经验，在飞机零件制造中适当采用缠绕、拉挤等低成本的自动化制造技术，填补这一空白。

5 采用高效、环保的切割、成型技术

由于复合材料的大规模应用，提高其切割和成型技术就显得越来越迫切。用传统工艺方法切割复合材料时粉尘大、污染高，而且易烧伤端面，成型的余量需要重新去除，因此，应推广采用自动数控高压水切割技术，切割、成型一次完成，生产效率和质量显著提高。

6 开展无损检测技术的研究与应用

为保证产品的安全性、可靠性及交付后的可维修性，需使用无损检测技术（超声、射线、激光超声等技术）对构件进行检测，以发现复合材料结构中的分层、脱粘、气孔、裂缝、冲击损伤等缺陷，并给出缺陷的定性、定量判定，为工艺分析提供依据。

因此，对制造过程及维修中使用的各种无损检测技术及设备的使用提出了更高要求，国外在这方面进行了大量研究，并开发了相关的产品，国内亦应在这方面加大研究力度。

结束语

随着先进复合材料及其相关技术的不断进步，世界航空复合材料新时代已经来临，在机遇与挑战面前，国内应看好前景，重视差距，准确定位，着力自主创新，从体制、设备、工艺、人员等方面作出努力，不断提高水平，促进我国复合材料制造技术逐步赶上国际先进水平，为我国大飞机项目的顺利实施创造条件。

（责编 金卯）