

# 先进拉挤成形技术及其 在大飞机复合材料结构中的应用

Advanced Pultrusion Technology Used on Large Aircraft Composite Structures

南京航空航天大学材料科学与技术学院 齐俊伟 李 勇 肖 军



齐俊伟

南京航空航天大学材料科学与技术学院高级工程师,在国内自主知识产权的自动铺带机和自动铺丝机等设备研制方面有突出贡献,目前承担高档数控机床与基础制造装备课题、国家民机预研重点课题等项目 3 项和省部级科研项目 5 项,获得国防科学技术一等奖 1 项,发表论文 18 篇,申报 / 授权国家发明专利 7 项。

安全、经济、舒适、环保是大型飞机的重要指标,而经济性是决定大型飞机市场竞争力的关键因素。根据空客公司统计,结构重量每降低 1%,

采用先进拉挤成形技术制造复合材料梁、桁型材成为该类复合材料结构自动化制造的发展趋势。因此,先进拉挤成形技术及其装备的研制也成为先进复合材料型材自动化制造的重要课题。

飞机总重可降低 3% ~ 5%, 油耗可减少 3% ~ 4%; 据统计大型飞机每减轻 1kg, 增加的经济效益超过 450 美元。重量既影响飞行性能又影响经济性, 因此减重对飞行器具有十分重要的意义。如何减轻结构重量一直是航空航天器研制追求的目标之一。碳纤维、硼纤维和芳纶纤维等先进复合材料的诞生为减轻飞机结构重量带来了曙光, 整体化制造的复合材料大型结构在减重、耐疲劳、可维护性方面大大优于传统的金属材料。

现阶段复合材料构件的成本仍比同代的金属结构要高, 复合材料成本问题与成形技术已成为其推广应用的障碍。近年来, 在复合材料的材料与成形工艺上创新的主要目标是降低成本和提高性能, 如美国的 ACEE 计划、ACT 计划、AST 计划、CAI 计划, 欧盟的 TANGO 计划和

ALCAS 计划等。就大型商用飞机而言, 在过去的 10 多年中, 先进复合材料结构研制开发已转向经济型——从力学性能的最大化转向通过低成本技术来获得经济上可承受的结构。自动化制造是提高复合材料产量和产品质量、降低成本以及改善工艺环境、实现绿色制造的关键。其中以预浸料自动成型技术, 包括自动铺带技术 (ATL)、自动纤维铺放技术 (AFP) 和先进拉挤 (ADP) 等为核心的自动化制造技术成为发展的重要方向之一。目前, 发达国家在航空航天复合材料制造业广泛采用自动化技术, 采用预浸料和数字化设计与自动化制造高效高速低成本。

## 先进拉挤成形技术的历史

加筋壁板是航空器结构的重要形式之一(图 1), 通过此类结构可以

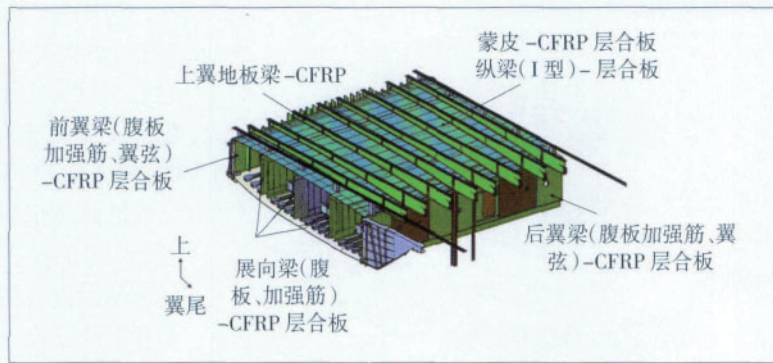


图1 复合材料加筋壁板

获得最大结构刚度和抗后屈曲能力，提高结构效率；地板梁类构件在飞机结构中亦占一定比例。采用碳纤维复合材料型材与壁板共固化、共胶接可以充分发挥复合材料的结构优势，对提高质量、降低成本、改善适航性具有相当重要的作用。采用先进拉挤成形技术制造复合材料梁、桁型材成为该类复合材料结构自动化制造的发展趋势。因此，先进拉挤成形技术及其装备的研制也成为先进复合材料型材自动化制造的重要课题。

先进拉挤(Advanced Pultrusion, ADP)成形技术的研究开始于20世纪80年代中期的日本JAMCO公司，经不断工艺改进，到1995年制造出满足空客性能要求的T型梁构件，1996年开始用于A330-200的垂尾。随着复合材料在大型商用飞机中的大量使用，复合材料的长梁、桁型材的制造日益凸显其重要地位。

### 先进挤拉成形原理

ADP成形技术综合了手工预浸料铺叠力学性能优势和拉挤成形自动化的优势，根据最终型材外形和性能要求，选择预浸料的合适宽度、预浸料层数和铺层方向。由于原材料采用的是预浸料，可以根据构件的设



图2 预浸料拉挤成形原理示意图

计要求，实现任何铺层(包括单向和 $\pm 45^\circ$ 织物预浸料)的组合。

ADP技术与传统的连续拉挤不同，为间歇式，通常要经过几个不同的处理装置(图2)。首先经过导向器和定型辊子逐步将预浸带合并成片材并折叠成所需形状(包括角材、工字梁、单T型梁、双T型梁或帽型梁)，未固化的预浸带芯材移动到加温加压模后停止，一般加压模为HALF模具，通过加温加压( $<1\text{MPa}$ )使预浸料部分固化而快速定型，定型温度和定型时间根据预浸料所选的树脂不同而改变。一般固化度达到70%(后固化前保持足够刚性的关键点)后，固化定型结束，模具分开并从构件上脱开，材料构件再次移动，固化的型材进入到后固化炉具，在后固化炉中停留加温使固化度从70%逐步增加，直至完全固化。

ADP预浸料拉挤模具的长度不需要达到整个构件的长度，完整构件的长度可以是加压模具的数倍甚至更长，制成构件的成形需经历若干次加压/拉挤工序，拉挤牵引需要定型模具分开并伴随未固化预浸料的进入，牵引到一定位置停止并合上加压模，加压固化一段时间后定型模具分开再重复前面的过程，至预定固化度

后工件离开热压模具，最后根据构件长度需要在合适的位置将型材切断。

### 先进拉挤成形技术优点

传统预浸料手工铺叠成形的缺点是劳动强度大、成本高、耗时长、质量稳定性差。而传统拉挤成形的缺点是复合材料构件性能达不到主承力结构的要求，纤维/树脂比例偏低，纤维取向控制、树脂固化和二次胶接较困难，表1为ADP成形与传统拉挤成形的比较。

ADP成形复合材料构件的突出优点是纤维取向性好、纤维体积含量高(可达到65%)和构件制造成本低，尤其是采用航空认证的预浸料体系时，构件成形的质量成本大大降低。

ADP成形构件的孔隙率 $<1\%$ (与传统拉挤成形的孔隙率 $<3\%$ 相比较，全尺寸构件可以通过自动超声检测)，ADP成形构件可用于航空主承力构件，这也是ADP成形的重要优点。

表1 ADP成形与传统拉挤成形比较

项目	ADP成形	传统拉挤成形
原材料	预浸料	干纱与树脂
树脂体系	环氧、酚醛等	环氧、酚醛等
最大纤维体积含量/%	65	55
最小厚度/mm	0.2	0.8
孔隙率/%	$<1$	$<3$
脱模剂	不需要	需要
角度偏差/ $(^\circ)$	$\pm 1$	$\pm 4$
二次胶接	可以	困难

ADP成形型材后加工包括精修、钻孔和后胶接等，由于ADP成形型材不采用脱模剂，二次胶接时其表面甚至不需要打磨等处理。精修、钻孔等工序可以在研制拉挤成形系统时加上精修、钻孔设备等模块。

大量的ADP工艺试验表明，目前ADP成形的最大截面可达 $250\text{mm} \times 100\text{mm}$ (A380飞机的地板梁高 $250\text{mm}$ 、宽 $100\text{mm}$ 、长 $7\text{m}$ )，厚

度可以为 0.2~10mm, ADP 成形没有真正的长度限制, 只要改变模具尺寸, 采用原有拉挤成形装备可以加工比目前更大截面尺寸的拉挤复合材料构件。

ADP 成形不仅局限于直的全预浸料型材, 同样可用于带有蜂窝芯的的长构件以及曲梁, 除了用于航空航天领域外, 还可以推广用于高性能汽车和其他工业领域。

### 先进拉挤成形技术的应用及国内外发展现状

采用 ADP 技术制造的复合材料型材自 1996 年开始应用于 A330-200 的垂尾以来, 空客所有垂尾上复合材料的拉挤构件全部改用 JAMCO 公司 ADP 型材, 这些型材通过热压罐共固化与翼面蒙皮复合。同样, 近年投入航线运营的空客 A380 机体结构中也大量使用了采用 ADP 成形技术生产的的梁、桁构件。空客 A380 不仅在面积达 122.3m<sup>2</sup> 的垂尾中大量采用了 JAMCO 公司的拉挤型材, 而且, 由于 A380 机身客舱分为上下 2 层, 为了支撑中间的甲板, 空客采用了 JAMCO 公司的碳纤维增强环氧拉挤工字梁。A380 飞机所用的拉挤型材尺寸远大于以往的拉挤复合材料构件, 该工字梁两端固支于机身, 可以承受很大的载荷。

近年来, 随着复合材料在飞机结构中的大量使用, 飞机中复合材料结构件日益朝着大型化方向发展。A380、波音 787、A350、A400M 等大型飞机大量使用复合材料筋肋与蒙



图3 波音787的复合材料加筋结构

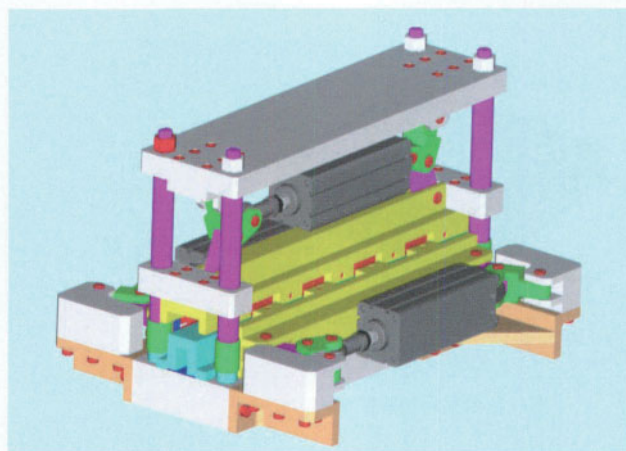


图4 带有自动牵引功能的加压加热模具设计三维装配图

皮共固化的工艺技术。采用 ADP 技术制造的长桁和梁类构件容易实现制件固化度的控制, 达到一定固化度的型材既能保持截面形状又能在热力作用下通过微变形适应不同型面, 如翼面、机身壁板, 最终与壁板共固化得到加筋壁板结构件。波音 787 机身成型时, 长桁放入带槽芯模, 外面直接自动铺丝形成蒙皮并共固化形成整体机身段 (图 3)。

从技术发展的角度看, ADP 技术在国外已经完成技术开发、演示验证和典型应用, 并走向大量应用阶段, 在飞机大型结构件, 采用 ADP 技术制造的复合材料梁、桁型材已成为高效能复合材料型材结构制造发展趋势。

国内复合材料的梁/桁/型材, 由于应用的局限, 目前只有手工成型、湿法拉挤型材, 只能满足低端产品要求。对预浸料拉挤成形技术, 国内南京航空航天大学 and 北京航空制造工程研究所已经着手开发研制。南京航空航天大学首先从成形原理入手, 进行 ADP 成形原理装备的研

制, 其中图 4 为带有自动牵引功能的 C 型材加压加热模具设计三维装配图, 图 5 为已研制完成的热压牵引设备, 目前正在进行其他辅助设备的研制和工艺试验。

国内 ADP 技术的研制应该以成形装备系统和原材料 2 方面作为切入

点, 其中 ADP 成形装备系统开发是 ADP 技术发展的关键所在, 此外, 还需对原材料进行适应性研究, 以期达到性能、质量和效率的统一。通过成形原理设备的研制和相关工艺试验进行技术改进, 最终研制出 ADP 成形工程设备; 通过研究形成具有自主知识产权的预浸料拉挤复合材料型材制造和应用技术, 填补国内空

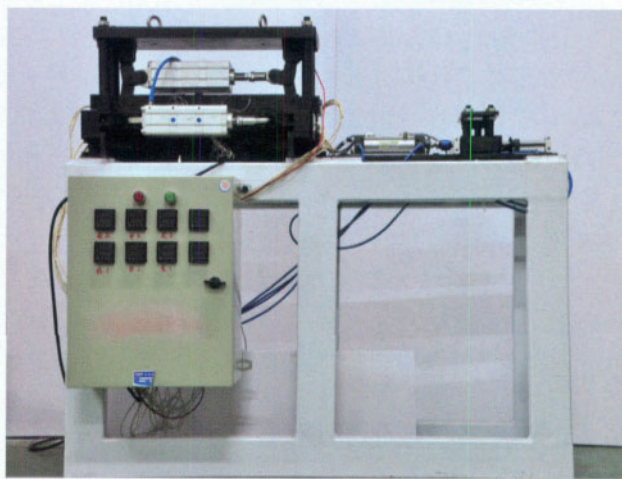


图5 热压牵引设备

白, 形成 ADP 研发和生产能力, 推动大型飞机复合材料构件高效率、高质量的自动化制造的技术进步; 通过提高复合材料型材的制造水平、提高复合材料产品合格率和生产效率、缩短制造周期、降低制造成本, 为大型飞机等新型飞机研制中扩大复合材料的应用奠定基础。

(责编 良辰)