

航空航天先进复合材料构件制造

课程讲义

于敏、周靖、郝小忠等

南京航空航天大学机电学院

前言

复合材料自 20 世纪 60 年代问世以来迅速发展，由于具有高比刚度、高比强度、性能可设计、抗疲劳性和耐腐蚀性等优点，越来越广泛地应用于各类航空航天飞行器，大大地促进了飞行器的轻量化、高性能化、结构功能一体化。同时，复合材料的应用部位已由飞机的非承力部件及次承力部件发展到主承力部件，并向大型化、整体化方向发展，先进复合材料的用量成为航空器先进性的重要标志。本课程重点了解复合材料的重要性及定义，学习航空航天领域最为广泛应用的碳纤维增强树脂基先进复合材料的应用概况、制造技术及未来发展方向。

航空航天先进复合材料构件制造

一、复合材料的重要性

新技术的发展也都伴随着材料的发展，材料是技术发展的物质基础，人类文明的发展也和材料的发展息息相关。下面以飞机制造所使用材料的发展以及飞机性能的发展为例来说明复合材料的重要性。

飞机最初采用木布结构制造，即用木条、三夹板做大梁和机身骨架，用亚麻布做机翼的翼面。20 世纪初，第一架载人飞机上天（图 1），开启了动力飞行器的时代，深刻改变和影响了人类的生活。发明人莱特兄弟采用的材料为木材(47%)、钢（35%）和布（18%），飞机的飞行速度只有 16 公里/小时。

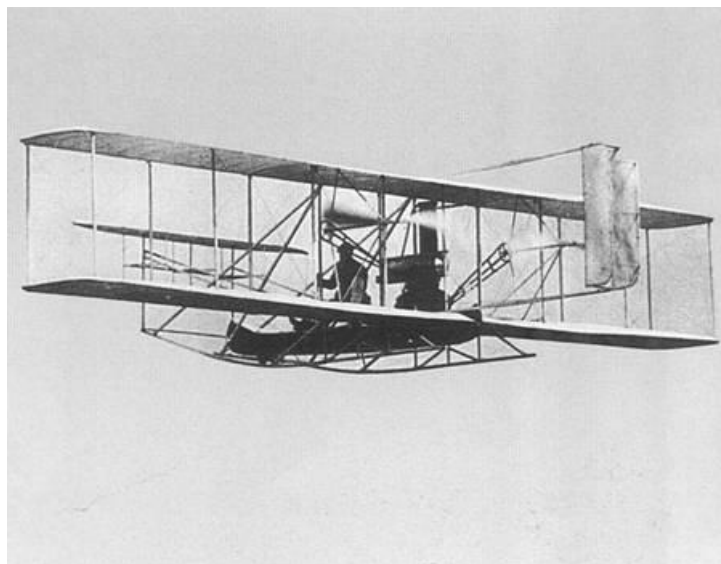


图 1 第一架载人飞机

随着材料的发展，1925 年以后，飞机机身逐渐用钢材代替木材，用铝板制作蒙皮，制造出了早期的全金属结构飞机。上世纪 50 年代后，铝、钛、钢及其合金材料成为全金属飞机的基本用材，金属材料的大量运用使飞机实现了超音速的飞行。比如 SR-71 “黑鸟” 侦察机（图 2），采用了大量当时的先进技术，如钛结构等，使其成为第一种成功突破热障的实用型喷气式飞机，实战记录中没有任何一架曾被敌机或防空导弹击落过。



图 2 高马赫数间谍飞机 SR-71（1966-1998）

70 年代后，新一代航空材料——碳纤维增强树脂基复合材料应运而生，具有高比强度和比刚度、耐腐蚀、抗疲劳等优点，大量应用在航空领域。复合材料的大量应用使得飞机的机动性和实用升限均大幅提高。如 F-22 战斗机大量使用了复合材料（图 3），其用量达到了 24%，使得飞机性能大幅提升，成为当今世界综合性能最佳的战斗机之一。

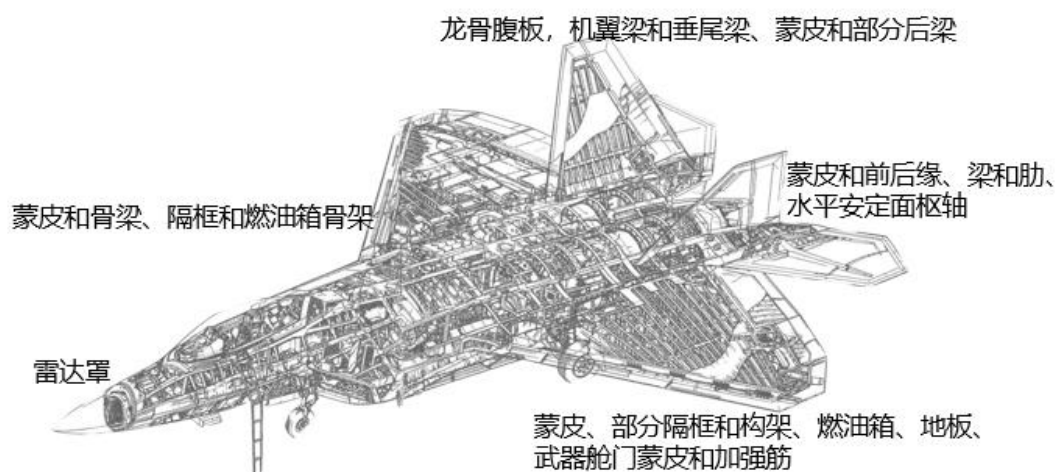


图 3 F-22 “猛禽” 战斗机

从上述飞机和材料的发展可以看到，“一代飞机，一代材料”，飞机的每一次进步都和航空材料的进步密切相关。由于复合材料优异的性能，其已在航空领域具有举足轻重的作用。

二、复合材料的定义

复合材料是由两种或两种以上化学、物理性质不同的材料组分组合而成，组合后的材料性能优于单一材料组分。示意图如图 4 所示，一般来说，复合材料包括增强体和基体两部分，其中增强体的作用是增强基体性能，而基体的作用是传递载荷。增强体常采用的材料主要包括颗粒、纤维和夹心等，基体一般采用树脂、陶瓷和金属等。目前，复合材料中以纤维增强材料应用最广、用量最大。其特点是比重小、比强度和比模量大。例如碳纤维与环氧树脂复合的材料，其比强度和比模量均比钢和铝合金大数倍，还具有优良的化学稳定性、减摩耐磨、自润滑、耐热、耐疲劳、耐蠕变、消声、电绝缘等性能。石墨纤维与树脂复合可得到膨胀系数几乎等于零的材料。纤维增强材料的另一个特点是各向异性，因此可按制件不同部位的强度要求设计纤维的排列。

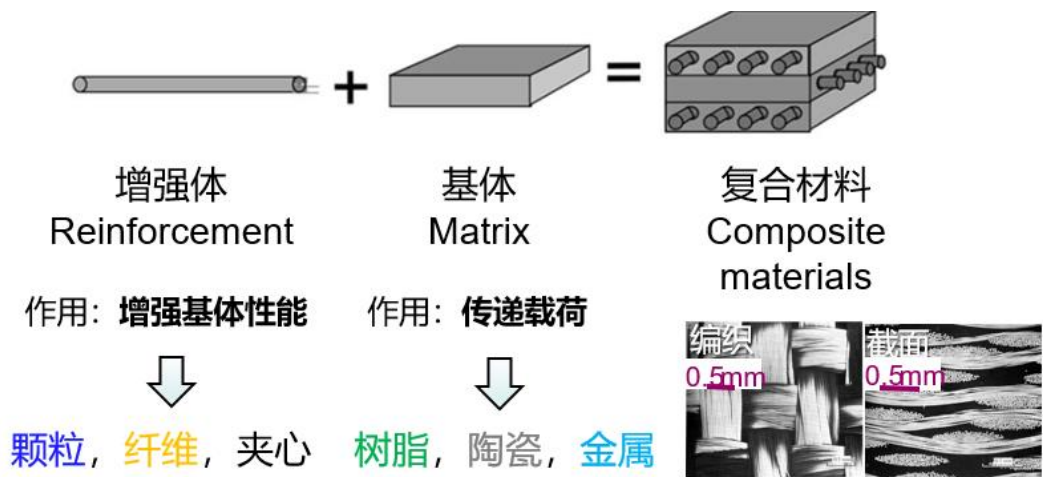


图 4 复合材料

三、先进复合材料在航空航天领域的应用概况及发展趋势

由于先进复合材料的优异性能，国内外竞相研究并力争在关键构件上大量使用。先进复合材料在航空航天领域的应用始于军用飞机，是为满足其对高机动性、超音速巡航及隐身等要求而不惜成本开始采用的。从图 5 可以看到，美国 F-35 和 F-22 的复合材料用量约为 36% 和 25%，这使得战机的作战半径、机动性能等核心战术指标被大幅提升。近年来由于结构轻量化的要求，民用飞机在复合材料用量方面也呈现增长的趋势。以 1990 年研制的波音 777 为例，在其机体结构中，复合材料仅占 11%，而且主要用于飞机辅件，如尾翼和操纵面等。到 2009 年波音 787 首飞时，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%（图 6），而空客 A350 的复合材料用量更是达到 52%（图 7），不仅复合材料占比激增，而且复合材料大量应用于飞机的主承力构件，如机身、机翼、中央翼等。国内民用飞机的复合材料用量与国外尚有一定的差距，2008 年开始研制的 C919 中复合材料用量约为 12%（图 8）。复合材料在直升机上的用量比例更高，近几年迅速发展的无人机也将复合材料用量推向更高水平。

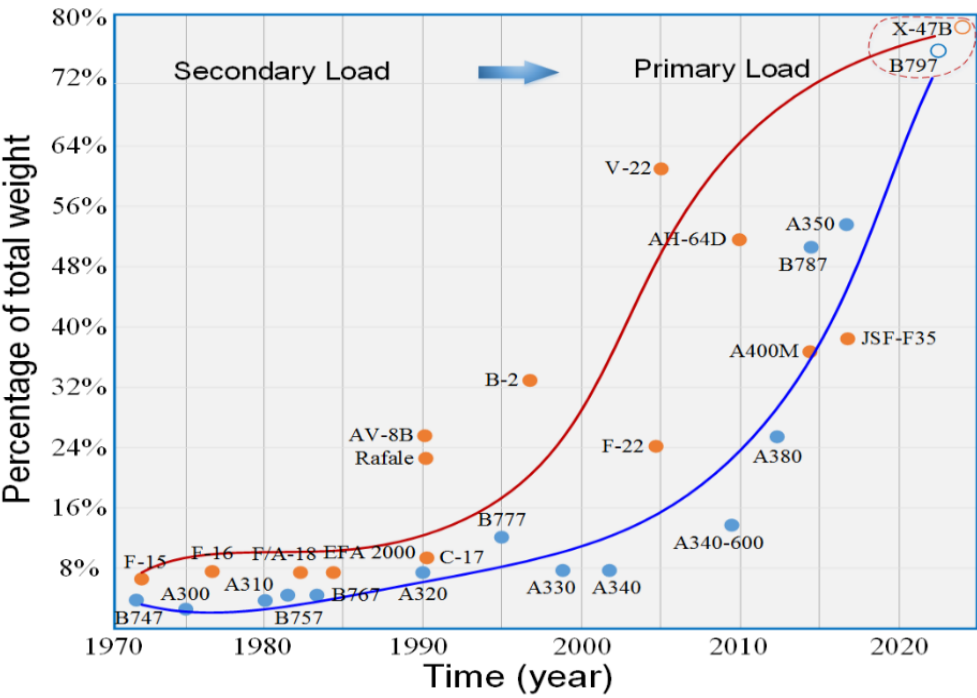


图 5 飞机结构复合材料用量的变化

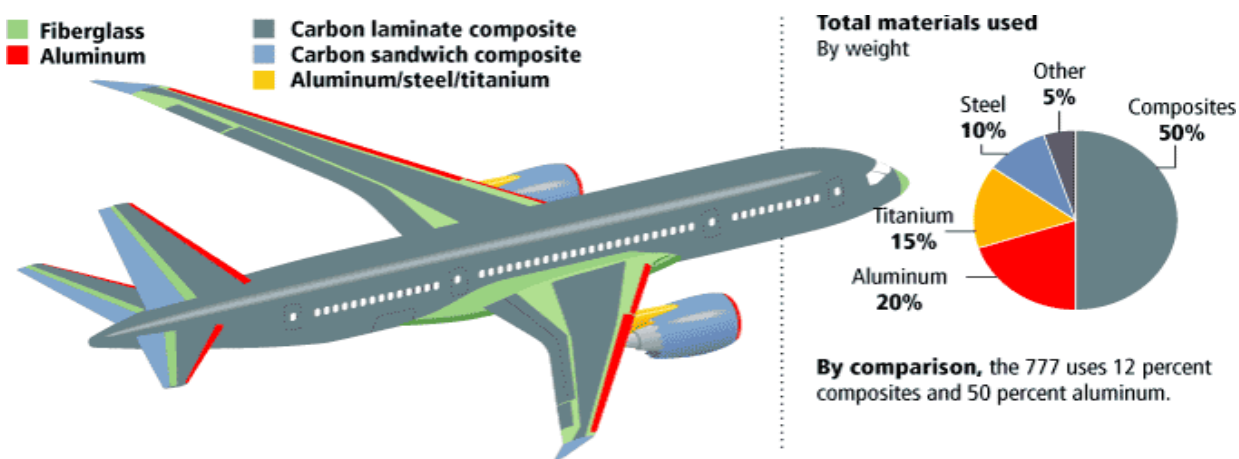


图 6 波音 787 的复合材料用量

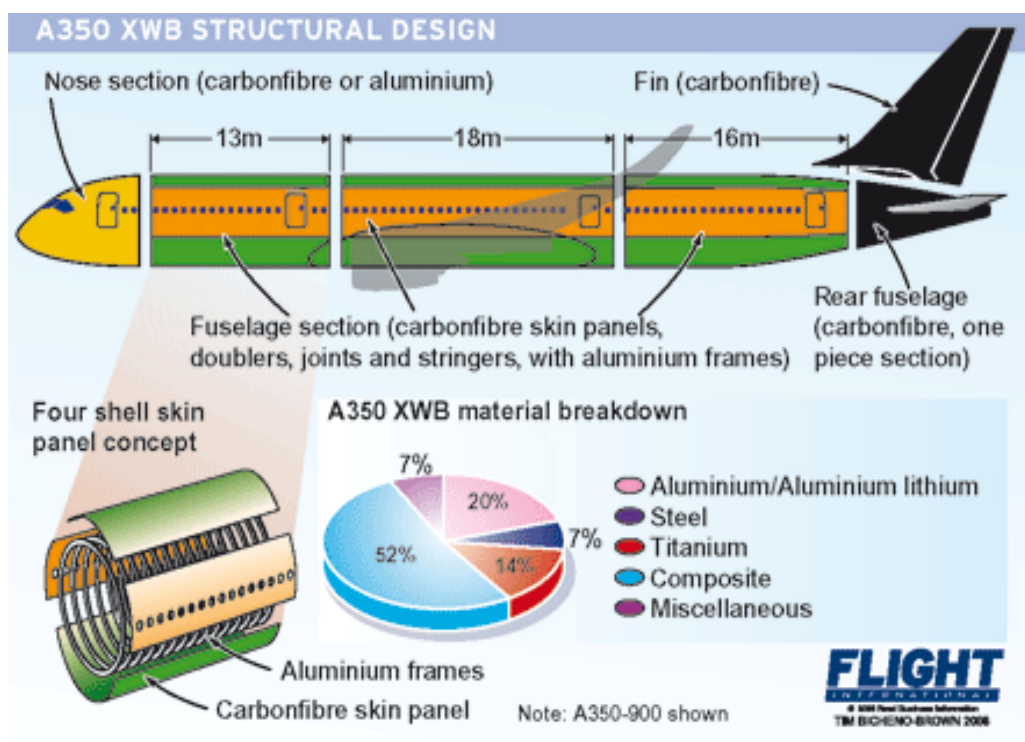


图 7 空客 A350XWB 的复合材料用量

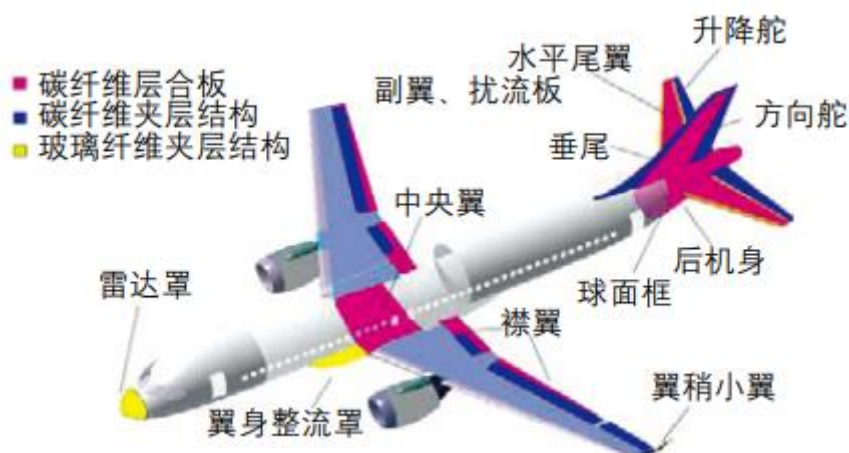


图 8 商飞 C919 的复合材料用量

复合材料在发动机机体结构上的应用晚于飞机结构，近年来也得到了大量的应用，图 9 为商用飞机发动机中复合材料用量的变化情况，主要是指短舱和发动机风扇段（冷端）的复合材料用量。2007 年复合材料用量翻倍增长的原因是由于 GEnX 采用了复合材料机匣。LEAPX、GE9X 与 GEnX 的用量相近。

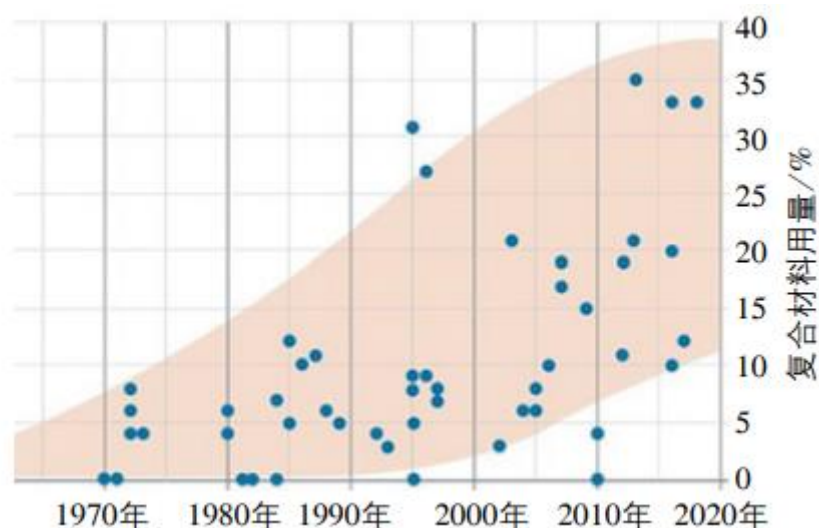


图 9 商用飞机发动机中复合材料的用量

航天飞行器对减重有更加迫切的需要，复合材料在航天领域的应用也非常广。美国、欧洲的卫星结构材料重量不到总重量的 10%，原因就在于广泛使用了高性能复合材料。目前卫星的微波通信系统、能源系统和各种支撑结构件等已经基本做到了复合材料化。在运载火箭和战略导弹方面，碳纤维复合材料以其优异的性能得到了较好的应用与发展，先后成功用于“飞马座”“德尔塔”运载火箭、“三叉戟”II (D5)、“侏儒”导弹等型号，美国的战略导弹 MX 洲际导弹、俄罗斯战略导弹“白杨”M 导弹均采用先进复合材料发射筒。

此外，先进航空复合材料在向大尺寸复杂曲面主承力构件方向发展，如客机后压力框（图 10）、客机整体壁板（图 11）等。由于复合材料的成型特点，飞机开始大量采用共固化、整体成型构件，这能够明显减少零件、紧固件和模具的数量，减少零件装配，降低装配成本和制造周期，进而降低制件总成本。同时，由于连接钉孔数量减少，可改善结构的承载能力，还可以减少结构分段、对接、间隙和台阶，使部件表面更加光滑，提高结构气动表面质量。以波音 787 为例，四个整体式全复材机身段（图 12）的应用，代替了传统金属机身段包含的约 6000 个铝合金板件和 20 万个左右的连接件，极大地简化飞机装配过程，飞机的可靠性显著提高。

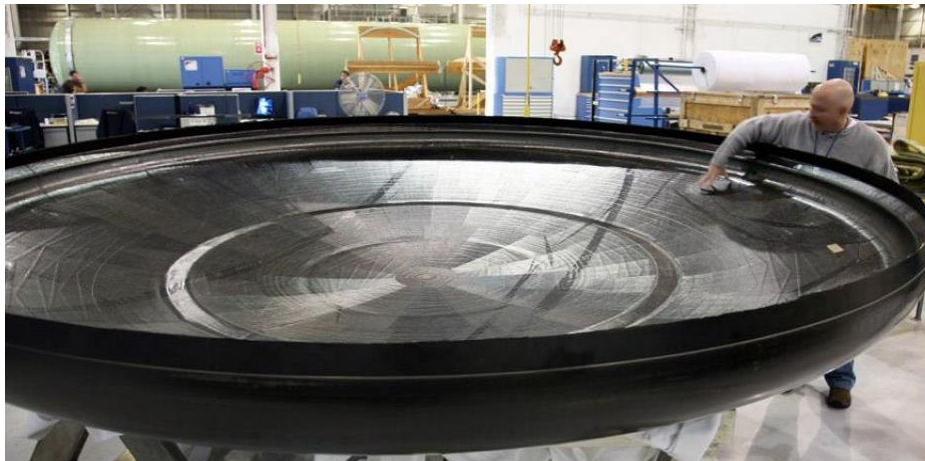


图 10 客机后压力框

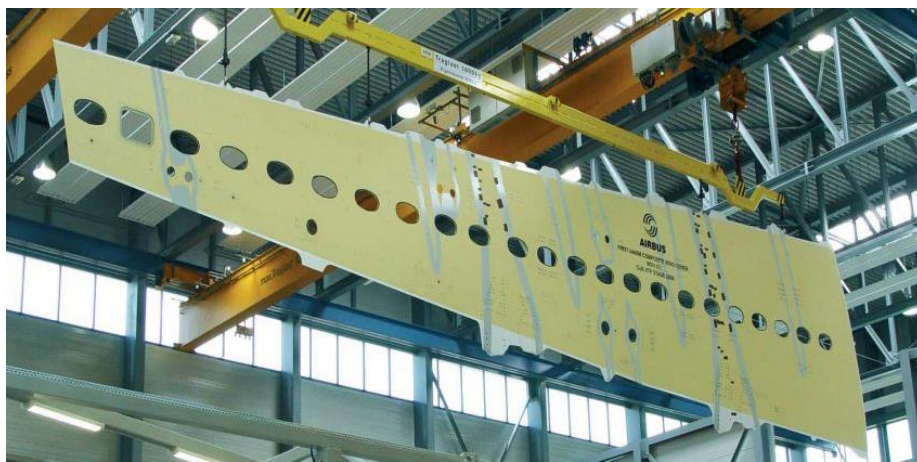


图 11 客机整体壁板



图 12 B787 复合材料整体机身段

四、先进复合材料成型技术简介

复合材料零部件制造主要分为赋形、固化、加工、装配等步骤。赋形是依托模具完成预浸料铺叠或采用液体成型工艺制作预制件的过程。固化是基于树脂分子发生化学反应，使赋形后的预制件经过粘流态、粘弹态、固态转变成制件的过程。加工主要是切除制件的边缘余量和钻连接孔。装配就是将加工后的多个制件连接成零部件的过程。下面根据不同的制造过程介绍下不同的复合材料成型工艺。

4.1 热压罐工艺

从国内外复合材料构件的研制和生产应用来看，迄今为止主要采用预浸料-热压罐工艺。热压罐成型技术是以预浸料为加工对象，通过热压罐来提供必要的压力环境，并在一定的温度下使预浸料叠层完成固化而得到复合材料零件的制造技术。热压罐成型技术是航空复合材料结构制造技术的主要组成部分，也是应用最为广泛、最为成熟的航空复合材料结构成型技术（图 13、图 14）。



图 13 热压罐固化 350XWB 机身舱段



图 14 热压罐固化 B787 整体机身舱段

4.2 自动铺放成型工艺

随着复合材料在机翼和机身等主承力结构中的大量应用，以及提高飞机结构产能的需求，复合材料结构制造的自动化制造技术也得到了快速发展，计算机控制的自动铺带（Automated Tape Laying, ATL）和自动纤维铺放（Automated Fiber Placement, AFP）预制体技术已成为复合材料结构制造的一种最先进的技术（图 15、图 16）。



图 15 自动铺丝机



图 16 自动铺带机

自动铺带主要用于翼面、壁板类复合材料制件的制造，而自动纤维（丝束）铺放主要用于筒体类制件，如机身结构的整体制造。自动铺带和自动纤维铺放的主要区别在于前者面向大面积、低曲率半径的铺层如蒙皮结构，而后者面向大曲率半径、多数是回旋体的铺层如进气道结构等。自动纤维铺放是介于自动缠绕与自动铺带之间的一种铺层方法，特别适用于复杂构件的制造。波音 787 和空客 A350XWB 均采用预浸料-热压罐工艺来制造机身。空客将机身的每段筒体分为 4 块壁板分别成型后再机械连接成为机身段的方案，而波音 787 采用了自动铺放纤维+共固化工艺（图 17）。



图 17 波音 787 机身制造

4.3 液体成型工艺

与热压罐工艺相比,复合材料液体成型工艺(Liquid Composite Molding, LCM)是将液态树脂(或加热熔化预置的树脂膜)注入铺在模具上的纤维预成型体,树脂在流动的同时完成纤维的浸润并经固化成为制品,可以省略预浸料加工、预浸料低温储存和使用昂贵的热压罐 3 道工艺过程,是进入本世纪以来发展迅速的一种低成本工艺(图 17)。液体成型的原材料主要是干态纤维和液态树脂,干态纤维和液态树脂的制造成本低,约为相同材料转化成预浸材料的 70%。热压罐成型的预浸料的储存寿命为 9~12 个月,而干态纤维材料保质期更长且可以在室温下保存。因此,液体成型原材料的制造、运输、储存成本有显著优势。此外,液体成型工艺可以脱离热压罐固化,既可制备大型整体复合材料制件,又可制备各种小型精密复合材料制件。制造大尺寸复合材料制件时,相比于预浸料-热压罐成型工艺,所用烘箱的设备费用为同等尺寸热压罐成本的 1/10~1/7。LCM 工艺主要包括三大类:即树脂传递模塑成型(Resin Transfer Molded, RTM)、真空辅助树脂渗透成型(Vacuum Assisted Resin Infusion, VARI)和树脂膜渗透成型(Resin Film Infusion, RFI)。RTM 的特点是采用闭合模具;VARI 的特点是仅有单侧开放模具,并仅需真空袋压;RFI 的特点是树脂以薄膜形式铺放在干预制品的层间,只有单侧开放模具,仅需真空袋压(也有部分采用热压罐固化)。图 18-图 21 是采用液体成型工艺制造的飞机复合材料结构件。

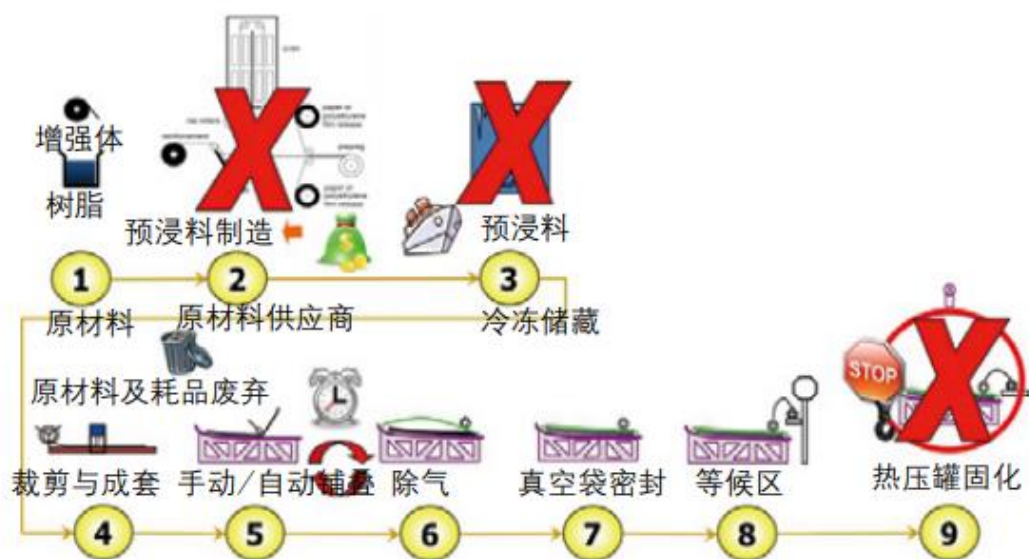


图 17 低成本的液体成型工艺（与热压罐成型工艺相比）



图 18 采用共固化 RTM（CoRTM）的 F-35 整体多腔结构垂尾



图 19 采用 RFI 工艺的 A380 复合材料后压力框

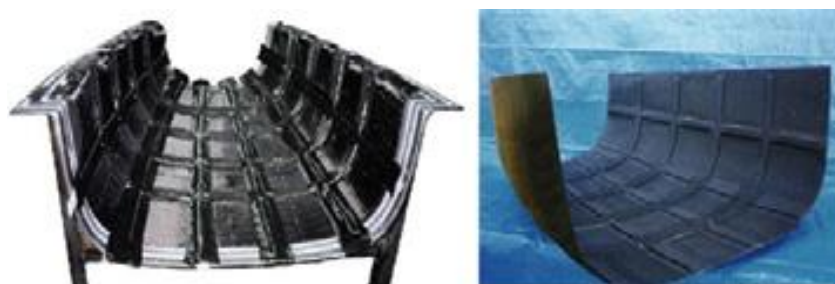


图 20 V System 公司采用 VARI 工艺成型的复合材料机身壁板



图 21 用 RTM 工艺制造的 F-22 机翼弦波腹板梁

俄罗斯 MS-21 新型客机的翼梁、蒙皮壁板和中央翼盒 6 个截面壁板等主承力构件是首次使用 VARI 制造的大型关键主承力部件。MS-21 (-200、-300、-400 型号) 机翼尺寸为 3m×36 m/37 m (-400 型号为 37m)，翼盒为 3 m×10 m，采用了自动铺放干丝技术 (Automatic Dry Fiber Placement, ADFP) (图 22) 和 VARI 成型技术，图 23 是范堡罗航展上的 MS-21 中央翼盒。此外，加拿大 Bombardier (庞巴迪) 公司研发的 C 系列飞机机翼是第一个采用液体成型工艺设计与制造并通过了适航的大型民用飞机复合材料机翼。图 24-图 26 是液体成型工艺中制备预制体所需的设备，包括大型缝合设备、立体编织机和单丝定向铺放设备。



图 22 MS-21 机翼下壁板自动铺放干丝成型工艺



图 23 范堡罗航展上的 MS-21 中央翼盒



图 24 大型缝合设备



图 25 立体编织机



图 26 单丝定向铺放设备

4.4 非热压罐工艺

非热压罐（Out of Autoclave, OOA）工艺是另一种低成本的新工艺（图 27），专指相对于传统预浸料+热压罐工艺，依然采用预浸料但不需要热压罐设备，仅在真空压力下固化的工艺技术。图 28 是用 OOA 工艺制造的 ACCA 大型机身壁板结构。虽然国外已经尝试将 OOA 材料和工艺应用在大型飞机结构上，甚至正在进行预研探讨将其应用于主承力结构的可行性，但人们依然对 OOA 产品的性能心存疑虑，目前主要用于通航飞机结构的制造。

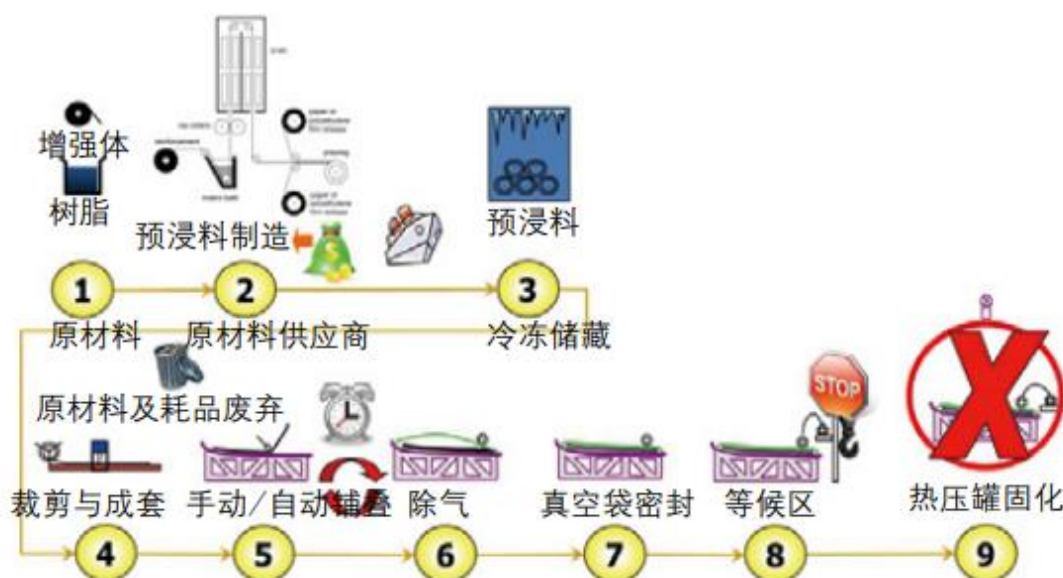


图 27 低成本的 OOA 工艺（与热压罐成型工艺相比）

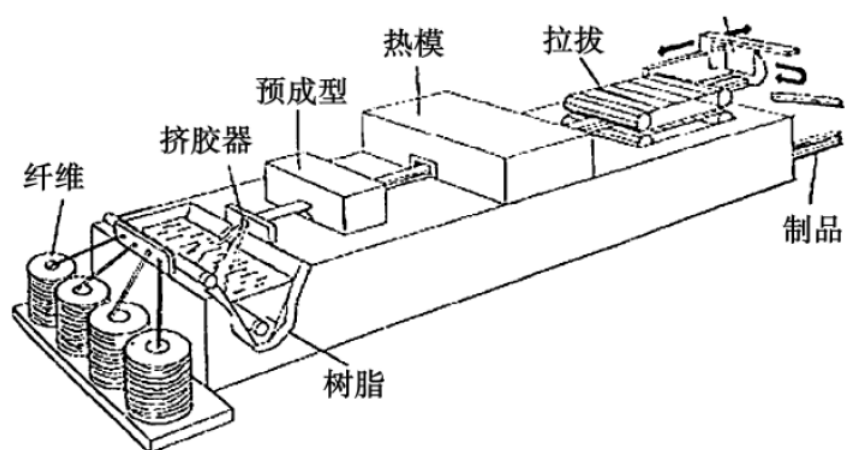


图 28 用 MTM45-1 材料制造的 ACCA 的机身蒙皮

总之，液体成型和非热压罐成型技术进程的快慢，取决于市场环境、技术和制造成熟度等多方面因素的影响，但其发展趋势，就像当年复合材料替代铝合金一样不可逆转。

4.5 模压、缠绕和拉挤成型工艺

在航空航天领域，模压成型、缠绕成型和拉挤成型也得到了大量应用，特别是运载火箭的发射筒，多数采用缠绕工艺。传统的拉挤成型工艺是将连续纤维束或带等增强材料进行树脂浸渍后，在牵引力的作用下，通过成型模具获得复合材料制件（图 29）。1980 年，日本 JAMCO 公司结合手工铺贴和自动拉挤工艺的优点，使用预浸料生产出直线度好和纤维体积分数高达 60%的制件，称为先进拉挤工艺（Advanced Pultrusion, ADP）。空客 A330、A380 垂尾的筋条和长桁、A380 机身长约 6 m 的 I 型地板横梁，均是 JAMCO 公司使用先进拉挤工艺制造的（图 30）。



拉挤成型示意图

图 29 拉挤成型示意图



图 30 先进拉挤工艺生产的垂尾长桁和地板梁

缠绕成型工艺是将浸过树脂胶液的连续纤维或布带，按照一定规律缠绕在芯模上，然后固化脱模成为制品的工艺过程（图 31）。根据纤维缠绕成型时树脂基体的物理化学状态不同，分为干法缠绕、湿法缠绕和半干法缠绕三种。缠绕成型用于桶型零件的制造，具有缠绕均匀，方便快速的制造特点。模压成型是将一定量的复合材料放入与金属对模中，在一定温度、压力作用下，固化成型构件的方法（图 32），其是复合材料生产中最古老而又富有无限活力的一种成型方法，具有生产效率高，产品尺寸精度高，重复性好等特点。

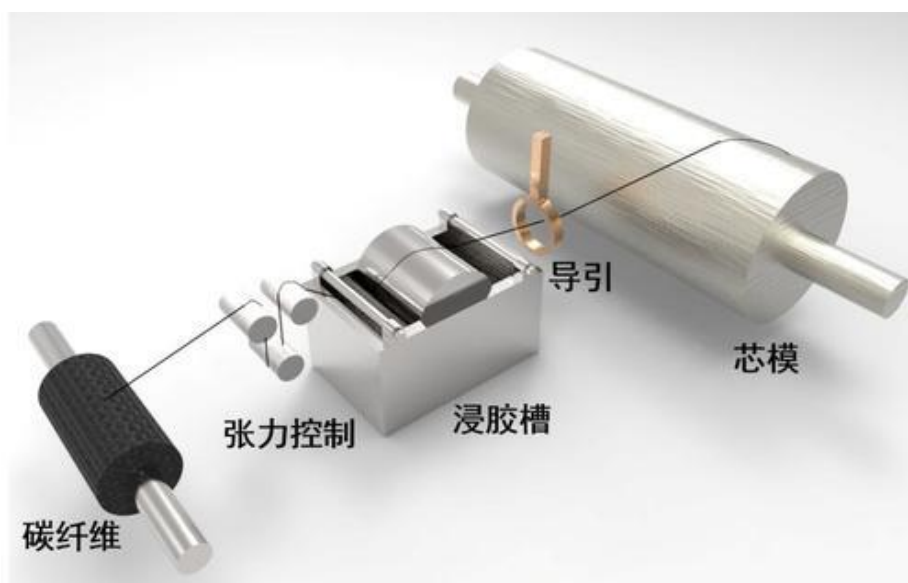


图 31 缠绕成型工艺

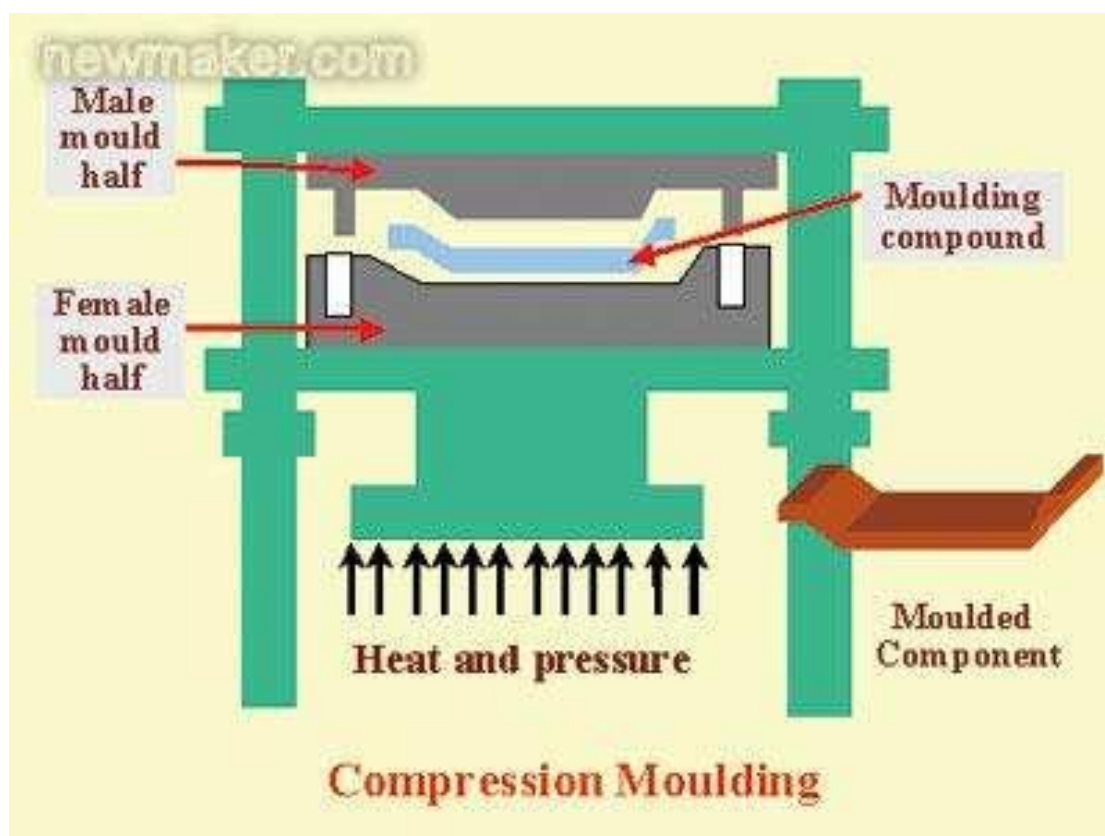
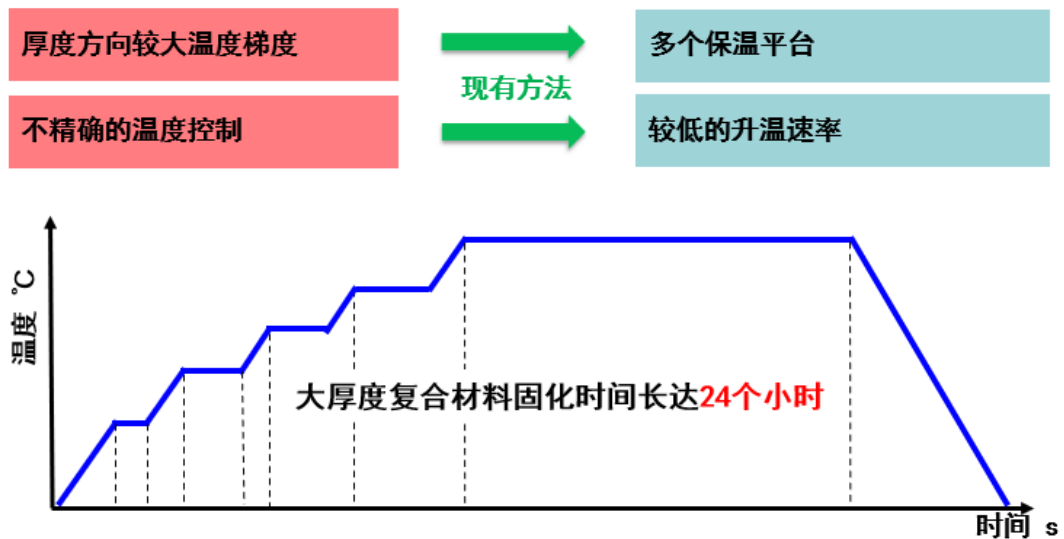
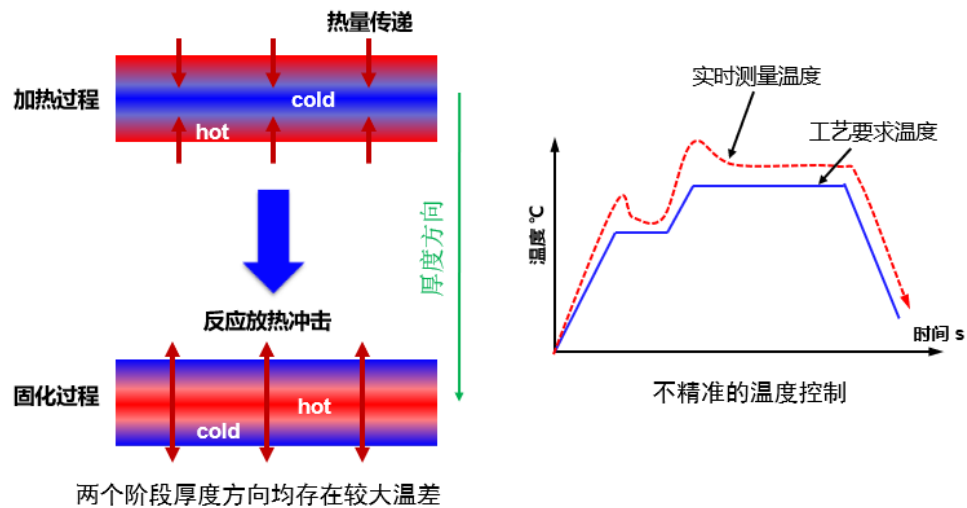


图 32 模压成型工艺

五、复合材料微波高压固化技术

由上述复合材料成型技术简介可知，热压罐固化技术是目前航空航天领域复合材料零部件制造最主要的方法，特别是主承力复合材料构件。然而，热压罐固化成型工艺的原理是通过外部热源由表及里的热传导和热对流方式对复合

材料进行加热，因此容易在材料的内部产生较大的温度梯度，且温度控制不精准（图 33），使得树脂固化不均匀，造成材料内部较大残余应力的形成，导致复合材料制件变形严重。同时由于空气和复合材料的低热传导率及复合材料构件厚度方向上温度均匀性的要求，热压罐的升温速率受到严重制约，保温时间长（图 34），导致热压罐成型工艺存在能耗高、固化周期长、生产成本较高的问题。



针对热压罐技术存在的上述问题，课题组提出了先进复合材料微波高压固化技术。

微波是指波长在 1mm~1m 范围内的电磁波，其波段对应的频率在 300MHz~300GHz 之间（图 35）。该频段的电磁波通常用于通讯、雷达、工农业生产和医学等领域，科研和工业中最常用于加热的频率是 915MHz（波长 32.8cm）和 2.45GHz（波长 12.2cm）。

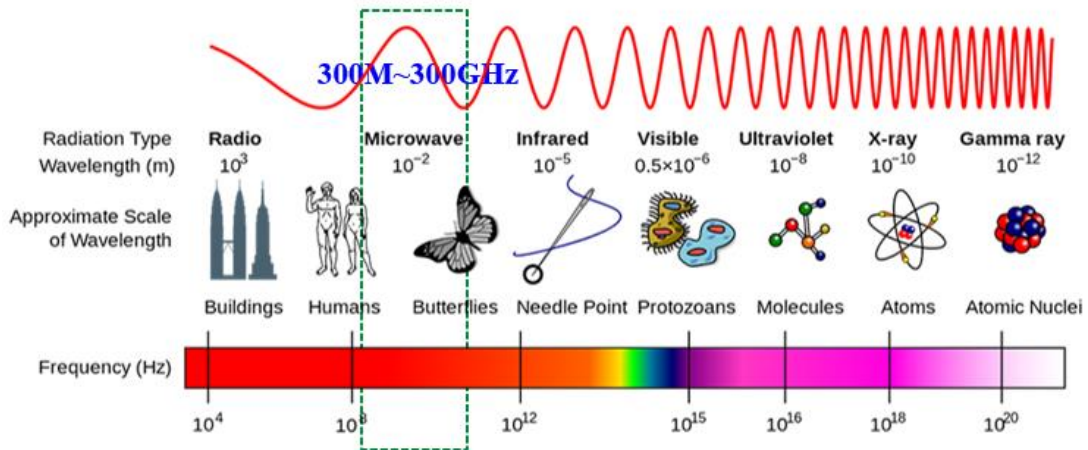


图 35 微波对应频段

相比于传统的热压罐固化方法，微波具有体积加热的特点，因此，在微波固化过程中，复合材料厚度方向的温度梯度明显减小（图 36）。

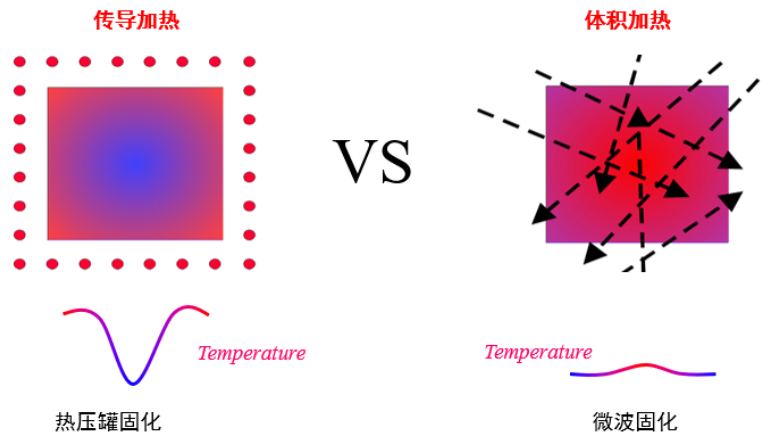


图 36 微波的体积加热特点

此外，微波能以光速快速传播，同时具有选择性加热的特性，仅选择性加热对其敏感的复合材料，气体介质和模具一般均不吸波，易于实现对复合材料的快速加热和精确控温，这也使得固化的周期明显缩短（图 37），能耗大幅降低。

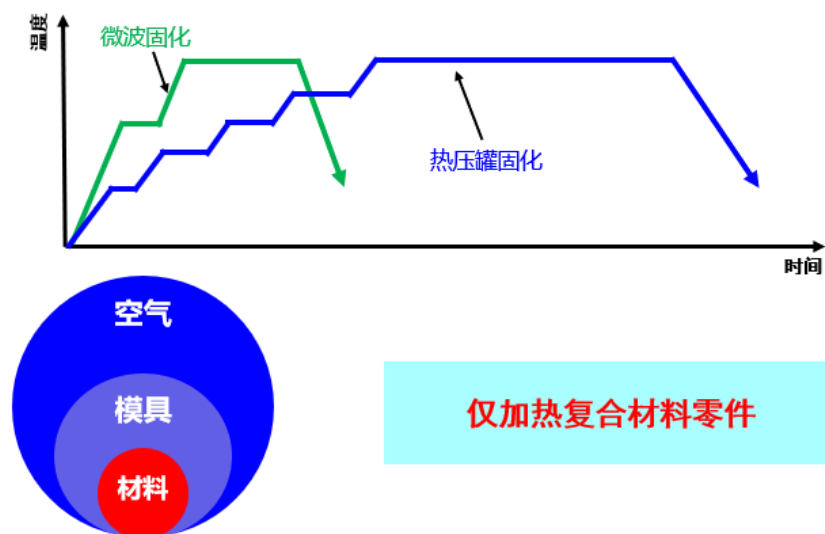


图 37 微波固化周期

基于上述微波固化技术的优势，结合复合材料固化成型所需的压力条件，课题组经过不断努力，突破了压力与微波耦合的关键技术，研制了国内首台复合材料微波压力固化装备。其中，复合材料的固化周期从 12 小时缩短至 4h，能耗从 500KW 降低到 30KW。在首台装备的基础上，又继续优化开发了新一代的微波高压固化装备（图 38），面向于实际航空复合材料零件的制造。



图 38 微波高压固化装备