



# 先进复合材料构件成型模具 和工装技术

## Molding and Tooling Technology in Advanced Composites Component

西北工业大学陕西省数字化制造工程技术研究中心 王永军 元振毅  
中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司 杨选宏 杨绍昌 田卫 孙永庆



王永军

副教授、博士,研究方向为金属塑性成形、复合材料成型、计算机集成制造、成形设备数控技术。曾主持和参加研究课题 20 余项,发表论文 30 余篇,获得发明专利 5 项,获省部级二等奖 1 项,三等奖 1 项,获省级教学成果一等奖 1 项。

市场对先进复合材料产品质量、性能、成本、周期等要求的不断提高,促进了先进复合材料工艺技术及其模具和工装技术不断创新发展。

近年来,先进复合材料在现代飞机上的用量不断扩大,已经成为铝、钢、钛之外的第 4 大航空结构材料。复合材料在 A380 中用量达总重量的 25%,在 B787 中更是达到了 50%,在 A350XWB 结构上的用量达到了 52%。其中应用最多的仍然是玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维、硼纤维等高性能纤维增强的树脂基复合材料,简称先进复合材料。其突出特点是构件在成型过程中,需要加热、加压和抽真空等工艺条件,材料成型和构件成型同时完成,其形位精度主要

依靠相应的模具和工装来保证。市场对先进复合材料产品质量、性能、成本、周期等要求的不断提高,促进了先进复合材料工艺技术及其模具和工装技术不断创新发展。

### 模具和工装的设计技术

在 CAD 技术发展的推动下,复合材料成型模具和工装广泛采用数字化设计技术,许多常用的结构采用模块化和参数化设计,以提高设计效率。

复合材料模具与常规钣金成型

模具的不同之处在于：对累积公差的要求更加严格；模具与零件贴合面尺寸的差异取决于模具的类型及其热膨胀特性；复合材料零件的最后尺寸是基体最高固化温度下的尺寸<sup>[1]</sup>。

在进行模具设计时，重点要考虑热匹配问题，钢和铝的热膨胀系数比大多数碳/石墨复合材料约大出一个数量级，当从固化峰值温度向下冷却时，金属模具的收缩会在构件中引起严重的残余应变或固有应变。在进行模具设计时，如果不能通过尺寸修正，则需要使用热膨胀系数较低的复合材料模具。一般采取一定的热膨胀补偿方法，按经验公式及试验验证，以制件质心为中心，把整个制件按式(1)缩小。按照缩小后的制件作为工程设计输入<sup>[2]</sup>。

$$F=1/[(T-P) \times \Delta T + 1], \quad (1)$$

式中， $F$  为热膨胀纠正系数； $T$  为模具的热膨胀系数； $P$  为复合材料制件的热膨胀系数； $\Delta T$  为固化温度和室温的差值。

对于简单的角度回弹问题，在模具设计时，预先把回弹角考虑进去，即制件夹角加上回弹角等于模具的角度，使制件脱模回弹后符合工艺数模要求。

对于复杂的制件，采用 CAE 技术模拟分析模具和工装的结构刚度、热膨胀、温度场分布等效果，为模具温度补偿和回弹修正设计提供依据。

## 模具和工装结构形式

复合材料成型工艺方法较多，相应的模具结构形式多种多样，先进复合材料成型模具结构形式主要分为如下几类：

### (1) 框架式模具。

为了增强模具局部和整体刚度，提高模具型面加热效率，减少模具变形，采用隔栅结构，设计制造模具骨架。图 1 为框架式模具实物照片。



图1 复合材料成型框架式模具



图2 组合模具<sup>[3]</sup>

### (2) 整体式模具。

对较小尺寸的复材制件，或采用石墨等材料制造模具时，可采用整体式模具，便于机械加工。

### (3) 组合式模具。

组合模具(图 2)通常采用金属制造，主要用于压机成型、模压成型、树脂传递模塑成型和注射模成型。组合模通常由上下 2 个半模构成，其加热方式可以通过模具的上下压盘传导加热，也可以通过附近的热源给模具加热，或内置的模具加热系统加热。

液态成型技术包括了树脂转移模塑(RTM)，及由 RTM 发展出来的真空辅助成型(VARTM)，树脂模溶渗成型(RFI)等。RIM 模具结构通常分为 3 部分，1 部分为型体，其余 2 部分为 2 个端盖，对形状复杂的或尺寸大的制品可将型体部分再分割组合，分型面分别做出凸舌与凹沟，并在 2 个端盖处设计注射口及排气口，同时考虑树脂分流道。

### (4) 自容式模具系统。

自容式模具(图 3)系统，加热和加压是模具的一部分，热源可以是电、热油或蒸汽，能够解决一些热压罐的不足之处，可以用来生产大于现有设备的零部件，且具有成本低、升压速度快、温度控制精确的优点。

### (5) 弹性体模具。

弹性体模具系统，用于整体加强壁板的共固化制造中，可成型如方向舵、水平安定面、扰流板、副翼以及小型翼盒等盒形结构。弹性体模具系统的一个变种是膨胀芯模或气囊芯模。用外面的充气源给它们充气使其膨胀，并将压力传递到层合板的表面。

### (6) 易变形模具。

易变形模具是指这种模具在某一种物理状态下保持一定模具形状，在另一种物理状态下变成另外的模具形状。比较有代表性的易变形模具是形状记忆高分子模具，这种模具通常由记忆成型构件原始形状的固定相和随温度变化能发生可逆软化与硬化变化的可逆相组成。固定相的作用是记忆与回复成型构件原始形状，而可逆相的作用则是发生与固定形变。

### (7) 连续成型模具。

主要有拉挤成型模具和挤压成型模具。

拉挤加工过程是将浸有树脂的纤维连续通过一定型面的加热口模，挤出多余的树脂，在牵引条件下进行



图3 自容式模具系统<sup>[4]</sup>

固化。

连续挤压是一种多工步过程,其成型模具为组合式,多运动部件组成。首先多层热塑性带在模具中加热并压成层合板,而后将层合板压入成型模具并加热压成所需截面的型材,最后将型材通过连续压模压成所需的弯曲形状,这种方法可以成型弯曲甚至扭转和变截面的型材零件,是一种新型的成型工艺。图4为其成型模具和设备。

#### (8) 模具加热系统。

模具加热系统主要分为:热气外部加热,通常采用热压罐(图5)或水压罐加热;模具本身或与模具紧密接触台板的电加热;电加热毯局部加热;模具或台板内部的流体加热,通常采用蒸汽或热油;高速喷射气流加热系统;微波加热和感应加热系统,主要用于小零件,对于较厚的层合板,可使其从内到外发生固化。

固化容器系统主要有热压罐、水压罐、压力容器、烘箱和热分流罐。其中热压罐是一种普遍使用的通用系统,压力可达3.0MPa,具有成本高、固化周期长的特点。水压罐压力更高,可达80MPa,具有成本低的优点。

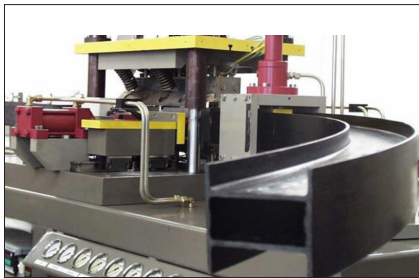


图4 连续挤压成型弯曲的型材<sup>[5]</sup>



图5 热压罐<sup>[4]</sup>

烘箱是一个加热容器,用于低压或真空压力下复合材料构件的固化,通过使用橡胶等高膨胀的模具材料,或者在模具中使用高压气体以提高其压力,其突出优点是运行成本较低。热分流罐是利用独特的压力容器提供成型的压力和热量,其中介质的膨胀和收缩是通过蒸汽和冷水流经在介质内的管线来实现。

### 模具和工装材料

对具有较大曲度的复杂构件,当模具与复合材料的热膨胀系数出现严重失配时,会使复合材料结构的强度和尺寸精度严重降低。在大型复合材料模具选材中,应考虑的主要因素是模具和制件之间热膨胀的一致性。常用的模具材料有:铝或钢、整体石墨、陶瓷、硅橡胶、电铸镍、殷钢、铜合金、Avamid-N、复合材料膜塑模具等。

殷钢是 Invariable Alloy 的简称,是铁与镍等稀有金属制成的含有33%左右镍的一种合金,主要的特征是在加热时膨胀系数很小,仅为  $2.20 \times 10^{-6} / (^\circ\text{C})$ ,远低于已知的任何一种金属的膨胀系数,只相当于碳钢膨胀系数的1/6,且经适当的回火、压延和旋展后,可均匀地保持近零的膨胀系数。它从根本上克服了碳钢受热易变形的弱点。殷钢主要有殷钢36(含36%的镍)和殷钢42(含42%的镍),是一种低碳奥氏体合金钢,其热膨胀系数与复合材料相匹配。图6为殷钢模具的一个范例。

易溶模具是指采用在某种溶剂中易于溶解的材料运用浇铸法或模压法制成空心或实心的模具。复合材料构件依赖这种模具成型后,从开口处通入合适温度的溶剂,使模具材料溶解进而从构件中流出。低溶盐和石膏是常用的芯模材料。另外,水溶性型芯材料也可由粘结剂和陶瓷填料组成,粘结剂为有机高分子材料,具有脱水固化、遇水溶解的可逆



图6 殷钢模具<sup>[6]</sup>

特性;陶瓷填料由氧化铝和高岭土组成,陶瓷料浆的固相体积分数使粘结剂具有良好的水溶性和高的热分解温度<sup>[7]</sup>。图7为易容模芯的使用原理。

复合材料模具多采用碳纤维或玻璃纤维复合材料制成,模具的热膨胀系数与成型构件的热膨胀系数大致相匹配,很好地保证了产品尺寸和型面精度,且模具重量轻。缺点是模具的制造工艺复杂、表面密封性较差、表面硬度较低、与金属模具相比使用寿命较短,且制造成本高。

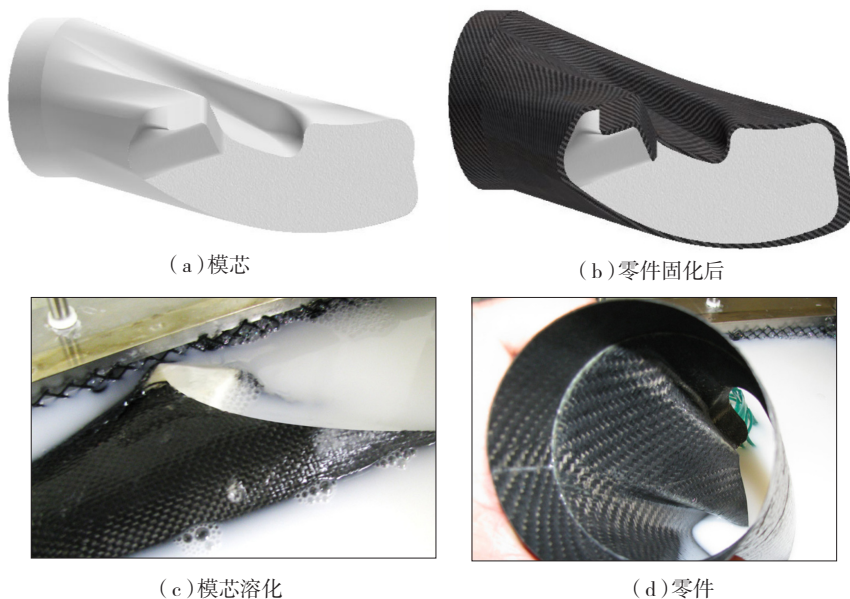
整体石墨模具具有热膨胀系数低、热导率高、热容量低和尺寸稳定的优点。缺点主要有升温慢和易碎,通常需要表面涂层。

陶瓷模具热膨胀系数较低,同时还是优良的绝缘体,但是成本高、难加工、热导率低、易碎。

碳泡沫是一种新型复合材料成型模具材料,其特点包括:(1)与碳纤维复合材料同属于碳材料,热膨胀匹配好,尺寸稳定性好;(2)重量轻,适合大尺寸复合材料构件成型;(3)耐高温,适合复合材料成型;(4)易于快速成型,易于机械加工和胶接成型,成本较低;(5)满足气密性需要特殊处理;(6)碳泡沫适合制造小批量复合材料构件的成型模具。

硅橡胶模具是利用硅橡胶受热膨胀的原理,使压力通过硅橡胶传递到制件上,达到对制件加压的作用。

丙烯酸酯胶片是通过将丙烯酸酯做成所需模具的形状,经硫化后即

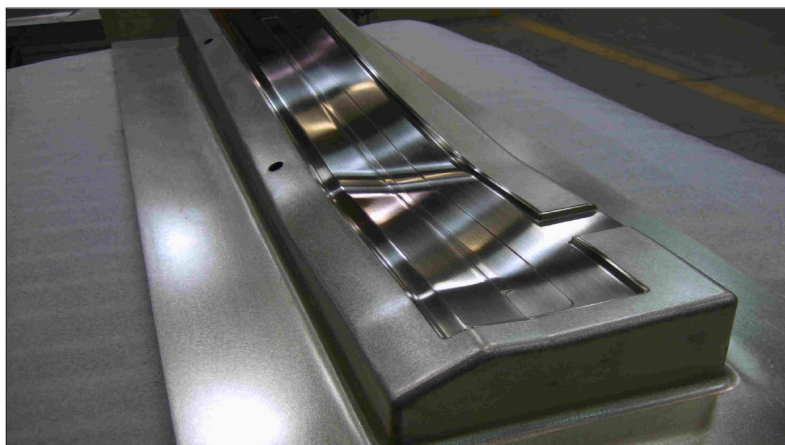
图7 易溶模芯使用原理<sup>[8]</sup>

可使用。该模具同硅橡胶模具相同，也是同金属模具配合使用。若制件的结构尺寸及表面要求较高时，则需在丙烯酸酯内铺纤维预浸料或其它加强材料，并且最好用金属模具硫化，以保证硫化后模具的尺寸稳定及表面质量。

低熔点合金模具的种类很多，如铅锌模、秘锡模、锌基合金模等，其特点是熔点低、易于制模，其难点在于控制其凝固收缩率。美国从20世纪70年代开始研制符合生产复合材料制品的锌基合金模具。锌基合金用于复合材料制件成型模具具有突出优点，如制模简便、制造周期短、生产成本低，并具有足够的强度、刚度、硬度、光洁度、气密性，使用寿命长，导热率高等。美国在20世纪80年代研制的Kirksite锌基合金模具，成功地制成了波音737尾部整流罩等复合材料大型结构件<sup>[9]</sup>。

### 模具和工装制造方法

采用殷钢包络板框架式焊接结构，型面一般采用10 mm厚的殷钢板焊接。由于型板只有10 mm厚，需要解决漏气问题，减少焊接变形和内应力，保证模具密封性。

图8 聚酰亚胺气相沉积镍模具<sup>[9]</sup>

非金属模具一般采用多工步完成，用复合材料制造模具的常规顺序为：采用石膏制作基准模型，而后进行数控加工；在基准模型上增加塑胶层；采用湿法铺贴或预浸料铺贴，将石墨/环氧铺层或玻璃编织布或碳纤维编织布铺贴在塑胶面石膏模上，并采用真空烘箱和热压罐压实技术制造生产用模具。

电沉积镍模具是通过电沉积方法，在芯模或塑料模具上形成一层可镀金属层，然后将芯模等去掉。

气相沉积镍模具是通过气相沉积的方法，在聚酰亚胺上沉积一层金属镍，如图8所示。

金属喷涂模具含有一层热喷涂金属壳，采用一些低成本材料结构作支撑，如木材、石膏或模具蜡。这些模具在简单的液压或气压下可以整体加热，因此能够提高生产效率，降低能耗成本。

对于RTM模具，主要采用数控加工，其型腔表面的光洁度越高，做出产品的表面质量也就越好，产品脱模时也就更加容易，不过相应的加工费用也会提高。

### 结束语

近年来，先进复合材料构件成型模具和工装技术发展迅速。国外在自容式模具系统、易变形模具、易溶

模芯、以及连续挤压成型等模具结构方面已经大量应用，并且在殷钢、碳泡沫、形状记忆高分子材料等新材料方面和电沉积镍、气相沉积镍等模具制造技术方面已成熟应用，虽然有些技术我国已开始起步，但应用的范围和成熟度还满足不了生产需求，急需在这方面加大研发力度，提升复合材料模具和工装技术水平，为加快型号研制提供制造基础技术保障。

本文共有参考文献9篇，因篇幅所限，未能一一列出，读者如有需要，请向本刊编辑部索取。

(责编 亦非)