



复合材料成型模具研究进展

章令晖¹ 李甲申² 韩宇² 王超¹ 刘鹏¹ 赵金涛¹

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100076; 2. 中国空间技术研究院, 北京 100086)



摘要: 介绍了航空航天器复合材料产品对成型模具的基本要求和常见模具结构形式, 讨论了树脂基复合材料模具的研究进展和改进目标, 对殷钢模具、石墨模具、碳泡沫模具、水溶性模具、低熔点合金模具以及形状记忆高分子模具的特点和存在问题进行了论述, 并分析了未来成型模具的发展趋势。

关键词: 航空航天器; 复合材料; 成型模具

The Progress of Research on Composite Forming Mould

Zhang Linghui¹ Li Jiashen² Han Yu² Wang Chao¹ Liu Peng¹ Zhao Jintao¹

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100086)

Abstract: In this paper, basic requirements and traditional structural types of mould for composite product on aerospace and aviation are introduced. Research progress and improving target of mould made of composite materials are discussed in detail. Finally, the developing trends of mould for composite forming are analyzed.

Key words: aerospace and aviation; composite materials; mould

1 引言

碳纤维等高性能纤维增强的先进树脂基复合材料, 以其比强度和比模量高、热膨胀系数小、可设计性好、易于整体成型等一系列突出的优点在航空航天结构上得到了广泛地应用, 现已成为航空航天四大结构材料之一^[1-3]。

值得注意的是, 复合材料产品的制造技术迥异于常规的金属材料, 复合材料的成型通常要在模具中完成, 在新材料成型的同时, 也完成了最终结构(毛坯)的成型。模具决定了制品的几何边界, 明确了与其他零部件的关系, 在很大程度上影响着制品的内部质量和表面状态, 这些都决定了模具在复合材料产品制造过程中起着举足轻重的作用。然而复合材料产品的制

造工艺种类繁多, 常见的有真空袋成型、热压罐成型、模压成型、缠绕成型、拉挤成型、软膜膨胀成型、喷射成型、电子束固化法、渗透成型(如RTM)等, 不同的成型方法对模具材料和结构形式有不同的要求, 同时又推动着模具技术不断发展。

2 传统模具结构类型

2.1 金属框架式模具

框架式模具一般由模板与支承结构组成。模板采用钣金、冲压等工艺成形所需的型面, 并要求具有较高的光洁度和密封效果。支承结构一般由金属型材(有时甚至是木材)制成, 用于支承和固定位于上面的模板^[4]。图1为一种框架式模具的分解图, 其内部为

作者简介: 章令晖(1975-), 高级工程师, 复合材料专业; 研究方向: 航天器复合材料结构成型工艺。

收稿日期: 2012-11-13

空心结构,热容量小,便于热量的传导,且重量较轻,转运方便。这种结构适用于热压罐成型、真空袋成型、真空导入成型等多种工艺。

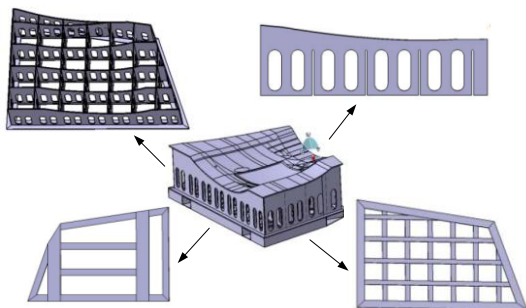


图1 框架式模具

2.2 金属单模或组合模

除了一些薄制品或者简单零件采用单模外,模压、拉挤、RTM等工艺所用成型模多为对模等组合结构形式,图2为一种简易的组合模具。各部分需要精密配合、运行到位、定位准确,因而要求较高的刚度、强度、表面硬度、形位精度等,通常采用碳钢或铝合金材料。虽然钢和铝表面光滑、致密、硬度大、易于脱模,清理模具时不易损坏,并且耐温性能好,但存在着和复合材料热膨胀系数不匹配的问题(钢的膨胀系数约为 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,铝的膨胀系数约为 $24 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,碳纤维复合材料的膨胀系数一般都低于 $3.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),导致制件型面精度不高,尺寸误差大、固化应力较大。

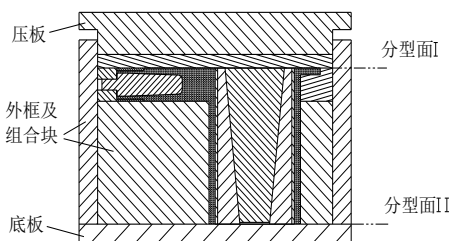


图2 简易的组合模具

2.3 膨胀或收缩模

膨胀模主要采用弹性材料,弹性材料的任意赋形特性对于复杂型面或者封闭腔体结构的成型十分便利。膨胀模利用弹性材料在加热过程中的体积膨胀特性,提供复合材料固化成型所需的压力。膨胀模所用材料有含硅或不含硅的橡胶,目前应用较为成熟且商品化的典型材料是有机硅橡胶。在使用橡胶模时,一般将它设计为成型模的内腔,其外部则采用封闭的刚性结构,有时也采用橡胶作为芯模,如图3所示。

收缩模主要有收缩管和收缩带两种类型,多用于

复合材料杆件或长轴类零件的成型。收缩管或收缩带的材料为热收缩塑料,系根据一些高聚物进行辐照处理后产生的“弹性记忆效应”制成,目前常用的有(改性)聚烯烃、聚全氟乙丙烯、聚氟橡胶等^[5]。但热收缩模存在一些不足,主要是固化压力控制的准确度低和制品表面的平整性差,以致需要机械加工,大大影响了产品的质量。

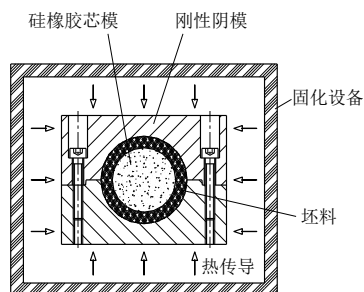


图3 热膨胀成型模具

2.4 复合材料模具

在国外航空航天产品中,复合材料模具的应用已经相当普遍。国内航空系统单位对复合材料模具研究较早、产量较大,其他单位包括航天部门使用还比较少。复合材料模具多半采用碳纤维或(和)玻璃纤维复合材料制成,并可作进一步的修补,因而可将模具制造得十分精确。由于模具材料与制品大体上属于同类材料,因而有效地解决了模具与复合材料制品的热膨胀系数匹配问题,极好地保证了产品尺寸和型面精度,是复合材料成型模具发展的主要趋势。这种模具已大量应用于尺寸与形位精度高或者尺寸超大的复合材料制品。图4为航天科技集团研制的高精度碳纤维复合材料模具。



图4 碳纤维复合材料模具

由于模具本身也是复合材料,使得其制造过程具有一定的复杂性和不可知性。目前,复合材料模具存在的主要问题如下^[6]:

a. 复合材料模具的制造工艺复杂,过程控制要求

严格,不同工艺方法、甚至不同批次产品质量差异相对较大。

b. 复合材料模具表面密封性较差,特别是当存在制造缺陷(如孔隙率过高)时,极容易出现真空泄漏问题。

c. 复合材料模具的表面硬度较低,易产生机械损伤,胶衣或者镀层易脱落。另外,在起吊、搬运过程中受撞击后容易产生分层、掉渣、变形等问题,影响正常使用。

d. 与一般使用寿命在千次以上的金属模具相比,复合材料模具的使用寿命相对比较短,一般只有几十次左右。当然,国外也有质量良好的复合材料模具使用近千次仍未出现问题的实例。

e. 复合材料模具的制造成本比普通金属模具要高出不少。

3 复合材料模具的改进目标

3.1 开发新材料

新材料的出现能够简化模具制造工艺,降低成本,提高模具质量。在这方面英国先进复合材料公司(ACG)开展了大量研究工作,该公司开发的一种商品名为zpreg的预浸料,是一种通过条形浸渍工艺制成的新型织物预浸料。这种预浸料不但保留织物原有的良好铺贴性能,而且提高了铺贴过程的排气效果。采用这种预浸料制成的复合材料模具表面光洁、孔隙率低、密封性好。此外,这种预浸料的铺贴性能优异,比常规预浸料节约一半以上的铺贴时间,且无需进行真空排除气泡和预压实等操作。目前,zpreg预浸料已大量用于制造商业化产品及其成型模具,取得了良好的效果^[5]。

采用碳毡制作复合材料模具也是一种可行的途径。与传统复合材料相比,易于实现模具表面尺寸的变化与过渡,因而更适于制造各种形状复杂的模具。同时由于便于机械加工和修补,也适合制造批量化产品的复合材料模具。

英国Amber公司、ACG公司、美国Cyttec公司、瑞士Gurit公司均开发了专门用于制造复合材料模具的中、低温固化高温使用的预浸料。有的材料在60~80℃甚至更低温度下固化,脱模后经高温后处理,可在180~240℃的环境温度下连续使用且保持较高稳定性。美国Comtool Tech公司用SiO₂为基体研制的C/SiO₂模具预浸料,其使用温度甚至可达1150℃^[6]。

3.2 提高使用寿命

提高模具的使用寿命,主要是提高模具工作面的硬度和强度以提高其抗损伤能力,降低孔隙率以消除真空泄漏现象,常见的方法是涂覆胶衣或者金属膜层。ACG公司开发了一种超高硬度的胶衣层材料,并将其涂覆在复合材料模具表面,这将大大提高复合材料模具表面抗摩擦和冲击损伤的能力^[5]。

复合材料孔隙包括夹层孔隙、乏树脂孔隙、未浸润孔隙和小分子气化孔隙等,其中树脂内部小分子气化和工艺组合过程带入的空气是孔隙形成的主要原因,往往很难杜绝。根据实际经验,在模具工作面的坯料叠层内嵌入气密性较好的弹性薄膜,并在模具连接部位填充真空密封胶带,可以彻底解决真空泄漏问题。

3.3 降低制造成本

复合材料模具是在母模上成型出来的,一个母模可以成型多个模具。一般来说生产的模具数量越多,分摊在每个模具上的母模制造费用就越少,相对制造成本就越低。母模材料有木材、石膏、玻璃纤维复合材料、高密度硬质聚胺酯泡沫塑料和环氧树脂泡沫塑料等。为降低母模的制造成本并缩短生产周期,国外正在研发性能更好、更容易加工、而价格又更低廉的新型母模材料。同时,更新母模设计概念,使其制造成本进一步降低^[7]。

3.4 提高型面精度

为了进一步提高复合材料模具的尺寸准确性和形位精确度,一方面需要从设计、材料和成型工艺等环节进行研究,进一步提高模具的制造质量;另一方面,需要研究复合材料模具工作表面进行后加工的可能性,即模具固化成型后,再对其成型表面进行精密或超精加工,以满足高精度产品的固化成型需要。

4 复合材料成型模具的发展趋势

有些航空航天器复合材料结构件外形非常复杂、精度要求极高,比如大型桁架结构接头、可展天线骨架、光学遥感相机支架、加筋壁板、S型进气道等,这些产品的成型和脱模对模具有着特殊要求。为满足这些要求的具有特殊功能的模具材料和结构便应运而生。

4.1 低膨胀模具

复合材料大多在加热条件下完成固化,如果模具和制品的热膨胀系数差别较大,可能产生较大的残余

应力,宏观上还会引起翘曲变形。采用低膨胀模具能够在很大程度上排除模具对复合材料成型的影响,极好地保证了制品外形尺寸和形位精度。

4.1.1 低膨胀合金模具

低膨胀合金主要是指殷钢(Invariable Alloy),殷钢的热膨胀系数仅为 $2.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 左右,远低于目前已知的任何一种金属的热膨胀系数,且经适当的回火、压延或旋展后热膨胀系数接近零。殷钢与复合材料产品的热膨胀性能相匹配,焊接性能好、耐高温性能好、使用寿命长,被认为是最具有竞争力的一种模具材料,也是近年来国外大量使用的一种模具材料。特别是以聚酰亚胺、双马来酰亚胺等高温树脂为基体的复合材料结构产品,都倾向于采用殷钢模具成型。近期,国内也已有多篇关于殷钢模具的报道。

略显不足的是殷钢的机械加工性能一般,大致与奥氏体不锈钢相当。为了消除内应力、获得较好的稳定性,需要在不同阶段进行相应的热处理,例如大面积焊接后进行完全退火,精加工前进行去应力退火等。作为模具材料,目前最主要的问题还是价格昂贵,甚至超过复合材料模具^[8]。

4.1.2 石墨模具

石墨是一种结晶形碳,是热的良导体,耐高温、耐腐蚀,热稳定性能好,热膨胀系数低(平行压制方向大约为 $2 \sim 3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,垂直压制方向大约为 $3 \sim 4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),摩擦系数小,这些都便于树脂基复合材料的成型和脱模,并获得较高精度的制品。同时,石墨还有非常优良的机械加工性能。理论上可以采用各种刀具来加工石墨模具,但由于石墨由粉末压制而成,仅适合干切削,因此应尽可能选用硬质合金刀具或含涂层刀具等耐磨性好的刀具。一些高精度卫星天线反射器常常采用石墨模具制造,用作模具材料的石墨一般为高纯石墨,同时也是高密和高强石墨^[9]。

石墨模具应用存在很多困难,主要是机械强度较低(抗压强度一般为 $20 \sim 80\text{MPa}$)、孔隙率大、脆性大、抗冲击性能极差,用作大型或者复杂的复合材料部件成型模具,无论加工、连接还是实际使用方面都存在问题。国外多采用结构致密、孔隙率较低、机械强度稍高的超细颗粒结构石墨制作模具;国内尚不具备类似石墨毛坯的规模化生产能力,绝大多数石墨材料结构疏松、颗粒粗大,孔隙率超过10%甚至高达25%。目前,只有为数极少的体积不大、形状简单的复合材料制件才用整体石墨材料作为其成型模具,国内亦鲜有相关文献报道。

4.1.3 碳泡沫模具

碳泡沫是一种网状多孔轻质材料,密度比碳纤维低,甚至可低至 $0.3\text{g}/\text{cm}^3$ 。其诞生至今已逾半个世纪,制备方法很多,主要包括发泡、氧化固定、碳化、石墨化等工序。现阶段更多的研究集中于采用各向异性的中间相沥青或煤炭等代替其他前驱体制备碳泡沫。碳泡沫除具有密度低、重量轻的优点,还具有热膨胀系数低($0.5 \sim 6.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)、尺寸稳定性好、耐高温性好(远高于复合材料固化温度)、耐酸碱腐蚀、易于快速成型和机械加工、便于粘接、成本较低以及性能可设计等一系列优点,是用作复合材料模具的理想材料。美国某大型军用飞行器发动机碳纤维复合材料尾锥管研制中,曾采用碳泡沫模具替代原先的镍合金模具,成本降低50%,重量减轻30%,同时提高了制品的尺寸精度与内部质量^[10]。

但目前存在的问题也不少:一是气密性稍差,有时需作特殊的密封处理;二是碳泡沫的力学性能较低,呈现各向异性,压缩强度仅为 $4 \sim 12\text{MPa}$,且随着孔隙率上升力学性能还有明显下降趋势;碳泡沫如果用作模具材料,固化过程经受热应力冲击后,产生的裂纹会引起应力集中发展为致命的问题;三是不同材料的导热性能差异大,沥青泡沫经过碳化,导热系数和热容量均较低、孔隙率较高,在高温环境下是优良绝热体,经过石墨化后导热系数明显提高,纵向导热系数明显高于横向,纵向大约为 $110 \sim 120\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,从而成为热的良导体。有研究表明,碳泡沫与其他材料复合有利于减少缺陷,提高力学性能。总体来看,碳泡沫的实际应用尚有一些待解决或改进的问题^[10]。

4.2 可溶(熔)模具

可溶模具是指采用某种易于溶解的材料经浇注、模压、粘接等方法制成的模具,一般多用作型芯。一些异形或者具有封闭腔体的复合材料产品,芯模不宜取出,往往需要采用可溶模具。将复合材料铺贴、缠绕、填充在可溶型芯表面并完成固化成型后,从开口处注入适当温度的溶剂或者将制品连同型芯浸泡在溶剂中,使可溶材料溃散分解进而从制品中流出。这个过程一般需要几分钟至几十分钟不等,甚至更长的时间。流出的溶液和填料经清理后可重复使用^[4]。比较有代表性的是用水作溶剂的水溶性模具,其所用的水溶性粘接剂主要包括天然高分子和合成高分子两大类。由于水溶性粘接剂无毒害、污染小、粘接强度高、易成形、易分解、成本低,已成为目前最主要的研究方向。国外曾采用水溶性模具固化成型复合材料

副翼^[11]。国内山东潍坊旭晨新材料有限公司生产的MERKA-2405胶粘剂,可与填料按照不同配比制成相应的水溶性模具,具有良好的工艺性,航天科技集团采用该模具制备了复合材料天线罩。

可熔模具一般是指采用低熔点合金制成的模具,多用作模具型芯或者活块。采用相应工艺完成固化成型后,将制品连同包裹在内的型芯或活块一同放入恒温炉中,或者浸入介质(例如油)中加热,使低熔点合金熔化、流出,即获得最终制品。熔化后的合金一般可以重复使用。低熔点合金种类繁多,以共晶合金用处最大,其中锌基合金、锡基合金等广泛应用于模具材料。低熔点合金模具具有制造简单、操作方便、成本低廉等特点,特别适用于形状复杂、中空或者不宜机械加工的复合材料产品的成型。其中,关键是要控制合金的熔点,使其高于复合材料的固化温度而低于材料的马丁耐热温度或者热变形温度。据相关文献报道,目前已应用于模压成型、树脂传递模塑成型、注射成型等多种工艺中^[12]。但是,低熔点合金硬度小、强度相对较低,难以满足刚性定位或者定向滑移等要求,在实际应用中还有一定不足。

4.3 易变形模具

易变形模具是指在不同的物理状态下保持不同结构形状的模具,比较有代表性的易变形模具是形状记忆高分子(SMP)模具。从分子结构来看,SMP是两相结构,即由记忆初始形状的固定相和随温度变化能可逆软化与硬化的可逆相组成,前者的作用是记忆与恢复制品的初始形状,而后者作用是形变的发生与固定。自上世纪八十年代诞生以来,SMP材料的独特性能迅速引起了许多领域研究者的关注,国外先后开发出形状记忆聚氨酯、形状记忆环氧树脂、形状记忆聚酯、形状记忆环氧树脂、形状记忆氰酸酯、形状记忆苯乙烯-丁二烯共聚物等各种类型的材料。SMP材料具有质量轻、变形量大、易于赋形、成本较低等优点,是一种具有较大潜能的模具材料。国外已经采用形状记忆高分子模具缠绕成型S型复合材料产品^[4]。据有文献报道苯乙烯Veriflex™的固态与弹性态之间的温度过渡区间较窄,且弹性模量迅速发生转变,在足够压力下可伸展至初始体积的两倍从而达到模具要求的理想形状,是非常理想的形状记忆模具材料^[5]。从目前的应用情况来看,SMP模具和水溶性模具一样,仅用于一些异形结构的成型,尚处于研究发展阶

段。

5 结束语

模具是影响复合材料质量、成本以及周期的重要环节。目前,国外在复合材料成型用模具材料的研究和制造方面已经产业化,模具材料和结构不断推陈出新。而国内受成本、配套设备等众多因素的影响,模具用材料的推广受到了限制,对成型模具的研究才刚刚起步。但无论从航空航天器对先进复合材料的需求来看,还是从提高产品质量、减轻劳动强度、降低制造成本考虑,新型模具材料和结构都是不可替代的必然选择。

参考文献

- 1 航空航天工业部科学技术研究院. 复合材料设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1990
- 2 章令晖, 陈萍, 沃西源, 等. 星载微带阵天线板的研制[J]. 航天返回与遥感. 2007, 28(2): 59~62
- 3 周睿. 复合材料成型先进模具的开发与应用[C]. 第十七届玻璃钢/复合材料学术年会论文集, 2008: 209~211
- 4 王永贵, 梁宪珠, 王巍. 先进复合材料构件成型模具和工装技术发展趋势[J]. 航空制造技术, 2009(Z1): 13~16
- 5 袁正华, 胡仲杰. 复合材料模具技术的进展[C]. 中国航空学会航空百年学术论坛复合材料分论坛暨第六届山东复合材料学术年会论文集, 2003: 77~79
- 6 张富官, 安鲁陵, 李汝鹏. 复合材料构件成型模具的参数化设计[J]. 宇航材料工艺, 2008, 38(6): 10~12
- 7 白树城, 曲建直, 王清海. 低成本先进复合材料模具制造技术探索[C]. 第十六届玻璃钢/复合材料学术年会论文集, 2006: 182~183
- 8 杨博, 李宏, 曹正华. 殷钢在复合材料成形模具中的应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(6): 68~69
- 9 刘向阳. 复合材料模具设计制造技术探讨[D]. 西安: 西北工业大学, 2006
- 10 Matthew M. Rowe, Richard Andrew Guth, Douglas J. Merriman. Case Studies of Carbon Foam Tooling[C]. SAMPE2005
- 11 Vaidyanathan R, Campbell J, Artz G, et al. Water Soluble Tooling Materials for Complex Polymer Composite Components and Honeycombs[J]. SAMPE Journal, 2003(1-2): 21~23
- 12 靳秀芝, 刘亚青, 张彦飞. 低熔点合金在树脂传递模塑中的应用[J]. 中北大学学报, 2007, 28(12): 150~152