

文章编号:1674-8190(2015)01-013-05

纤维增强复合材料在模具上的应用动态

王霖, 苏佳智, 晏冬秀, 刘卫平

(上海飞机制造有限公司 航空制造技术研究所, 上海 200436)

摘要: 伴随着航空用复合材料零件的大型化、复杂化、高精度化及批量化发展趋势, 航空制造业对复合材料零件成型所用模具提出了更高要求。从模具材料角度分析了纤维增强复合材料应用于模具的优势; 介绍了模具用纤维增强复合材料的概念和模具的制造过程; 综述了纤维增强复合材料模具在国内外的应用情况及发展趋势; 提出了发展复合材料模具的必要性和迫切性。

关键词: 纤维增强复合材料; 模具; 航空制造; 零件成型

中图分类号: TH145.9; V261

文献标识码: A

Application Development of Fiber Reinforced Composites on the Mould

Wang Lin, Su Jiazhi, Yan Dongxiu, Liu Weiping

(Institute of Aeronautical Manufacturing Technology, Shanghai Aircraft
Manufacturing Corporation, Ltd., Shanghai 200436, China)

Abstract: The higher challenge and requirement are put forward for molding mould, with the trend of aviation composite parts becoming bigger, more complicated, more precision and more massive. The advantages of fiber reinforced composites used in mould are analyzed from the view point of material; the fiber reinforced composites used in mould and its fabrication process are introduced; the domestic and foreign application and development trend of fiber reinforced composites mould are summarized. Finally the necessity and urgency of developing composites mould are emphasized.

Key words: fiber reinforced composites; mould; aviation manufacturing; parts forming

0 引言

模具是复合材料零件制造过程中的主要工艺装备,其优劣对制品的外形及质量起着决定性作用^[1-2]。模具材料是影响产品质量、加工周期与经济成本的一个重要因素。随着复合材料用量在航空领域的急剧增加,为了满足零余量装配的苛刻要求,越来越多的复合材料零件呈现出结构复杂、尺寸和形状精度要求高的趋势,且许多零件需要大型化批量生产,依靠金属模具加工的单一手段无法满足日益高要求的复合材料成型工艺。目前,先进复合材料构件成型的模具材料和结构出现了许多形

式,为高精密复合材料构件制造提供了更多的加工手段和方法^[3]。纤维增强复合材料模具技术,作为航空复合材料零件制造的关键技术之一,是当前复合材料发展的重要方向,对纤维增强复合材料在模具上的应用情况开展研究,是发展复合材料模具技术的基础和前提,具有非常重要的意义。

1 纤维增强复合材料应用于模具的优势

目前适用于成型复合材料零件的模具材料主要有:传统金属材料(例如钢、铝等)、新型金属材料 Invar、纤维增强复合材料。传统金属材料模具由于材料价格低、加工较为简单、使用寿命长等优点得到了广泛的应用,但其制造周期长、重量大、制造复杂型面的难度高、不利于生产小批量产品,尤其

收稿日期:2014-10-22; 修回日期:2014-12-02

通信作者:王霖, 515580129@qq.com

是金属材料模具与复合材料零件的热膨胀系数不匹配,使零件制造精度难以提高。Invar的热膨胀系数虽可以与复合材料较好的匹配,但Invar成本高;欧美国家对于出口中国Invar有一定的限制;其焊接难度大,焊接大型模具时在接缝处易产生漏气及变形;机加难度大,Invar材料的软、粘特性对刀具损伤大^[4-5];导热性较差,浪费能源;重量大也给大型模具的制造、转运、使用带来不便。相比而言,纤维增强复合材料具有成型精度高、重量轻、易周转、热容量小可简化固化程序、缩短固化周期等优点,但是纤维增强复合材料模具易损伤,使用寿命较短,成本较高,这在一定程度上限制了其应用广度。

将纤维增强复合材料应用于模具具有以下优势:

(1) 模具材料的热膨胀系数与复合材料制件的热膨胀系数相匹配,成型精度高。热膨胀系数不匹配是导致模具与复合材料零件之间相互作用而产生沿零件厚度方向分布不均的残余应力的主要原因,如果模具的热膨胀系数与零件的热膨胀系数较为接近,则二者之间的相互作用程度就会减小,最终产生的残余应力也会减小。因此,从热膨胀系数角度考虑,选择复合材料模具将有利于减小由模具因素导致的固化残余应力,改善零件变形情况^[6]。

(2) 适用于加工大型复杂型面。当模具型面非常复杂且尺寸较大时,若采用金属材料作为模具材料,一种方法是铸造加工,先铸出毛坯,然后数控加工型面,铸件的加强筋及模板要求较厚,一般需要20~30 mm,导致模具重量大,且铸件内部易有砂眼、气孔、疏松等缺陷,这些缺陷将影响模具型面的气密性和表面质量。另一种方法是采用焊接框架式结构,将模板滚压成型后与框架焊接,再数控加工型面。这种结构适用于形状相对简单、开敞的产品,当产品结构相对复杂时,模板滚压型、加工、协调等非常困难。上述两种加工方法的生产周期均较长。复合材料模具由母模翻制而成,母模材料的加工难度较金属容易得多,生产周期也较短。

(3) 减少复合材料零件固化过程中的热容量和温差,便于简化固化程序,缩短固化周期。

(4) 复合材料模具比重低,比相应的金属模具

更易于搬运,从而降低了对转运设备的要求,模具使用起来更方便。

(5) 复合材料模具型面由预浸料铺叠成型,可做任意的修补,因而具有比较好的可修复性。其真空完整性可修复,还可以恢复表面光洁度。

(6) 如果发生损伤,新模具可以从母模翻制过来,更为经济,更适于批量生产。

(7) 母模可以做其他钻孔工装、夹具等,可重复使用。

综上所述,综合考虑成型精度、机加成本、运输成本与制造周期等因素,纤维增强复合材料模具更适用于成型大型结构、型面复杂且精度要求高的复合材料零件。尤其对应用于纤维铺放设备的旋转工装而言,模具的重量是一个重要的考虑因素,更适合使用纤维增强复合材料^[7]。

2 模具用纤维增强复合材料概述

目前,应用于模具的纤维增强复合材料主要是中、低温固化高温使用的预浸料(LCHU)。国外自20世纪70年代就开始了复合材料低温固化技术的研究,ACG公司于1975年首先发展了第一个低温固化树脂体系LTM10,并于20世纪80年代推出了LTM系列预浸料产品。20世纪80年代中期,低温固化复合材料开始应用于工装领域^[8]。如今,英国Amber公司、ACG公司,美国Hexcel公司、Cytec公司、Airteck公司,瑞士Gurit公司等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模具用预浸料产品。LTM系列预浸料的特点为:所用树脂多为在室温附近具有较高活性的多官能度树脂/固化剂/促进剂混合体系;其固化反应温度范围较宽,固化反应速率和反应程度能有效控制;需以多步升温—恒温程序固化与后固化;低温固化结束时,固化程度不超过50%;每一步固化反应的 T_g 始终高于该步固化或后固化温度约20~50℃,且略高于下一步后固化温度。这样既能保证树脂基体在后固化中有一定的反应活性,又可消除固化反应中的内应力,有利于获得良好的尺寸稳定性^[9]。

用这类预浸料来制作模具时,通常在室温或略高于室温的温度下在母模上加压固化,然后脱模,再逐步升温固化到200℃以上,最终制品可在

175℃以上长期使用。由于成型所需的加压固化温度低,降低了对母模材料的耐温要求,可以选择石膏、木材或泡沫塑料等低价材料制造母模,从而极大地降低了复合材料模具的制造成本^[10]。模具的制造过程如图 1 所示。

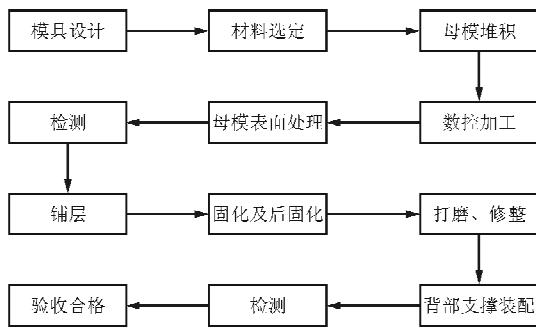


图 1 复合材料模具的制造过程

Fig. 1 Manufacturing process of composites mould

模具型面精度和表面质量是保证固化后零件质量的重要因素。为了满足型面精度要求,在选择模具用预浸料材料时,应考虑复合材料零件的固化温度、材料的适用期、可修复性等因素,并通过经验与相关计算,确定材料的铺层角度、铺放顺序、铺层比及铺层数。为了保证模具型面表面质量,制造时需要在母模上涂敷胶衣层。

3 纤维增强复合材料在模具上的应用情况

自 20 世纪以来,纤维增强复合材料模具开始在各个领域广泛应用,如雷达天线罩、电磁透波窗、安装设备用活动房屋、天线反射体、游船、浴缸、水箱、儿童游乐设施等^[11-12]。在欧美,复合材料模具在航天领域(运载火箭、人造卫星和宇宙飞船)以及大型客机上都得到了广泛应用,例如使用复合材料工装成型的发射器整流罩模具、B-1B 轰炸机镜面机翼成型夹具、A320 垂尾装配夹具、B747 排放滑动接头夹具、B757 发动机壳胶合夹具、雷达罩成型夹具等^[13]。波音与 ATK、Alcore、Cytec、Hexcel、GrafTech、Odyssey 等公司联合为 B787 机身 43 段研发轻质碳泡沫/双马树脂(BMI)芯轴,该芯轴比传统殷钢设计轻 57 t,降低了对起重机、操作设备和铺丝机的能力要求;美国国防部制造技术项目(ManTech)正在研究经济可承受的 F-35 复合

材料工装;ACG 公司设计了 B787 项目的许多复合材料工装,其中 LTM318 系列预浸料被大量应用在 B787 项目的复合材料工装生产上;Hexcel 公司的复合材料模具所用 HexTool 材料为短切的高强碳纤维浸渍高性能 BMI 树脂,其采用准各向同性材料,可以使用机械外加工方式,模具精度高,还可以通过修补/再加工的方式来修改模具的尺寸,模具所允许的形狀更复杂。HexTool 材料工装如图 2~图 3 所示。



图 2 HexTool 工装的机械加工

Fig. 2 Machining of HexTool mould



图 3 机翼前缘的 HexTool 工装

Fig. 3 HexTool mould for aircraft wing leading edge

该材料已经成功用于制造 A350 机身壁板的两个模具,其中一个模具尺寸为 4 m×5 m;另一个模具的尺寸为 4 m×8 m,在 7×10^5 Pa/190℃条件下固化,然后在烘箱中完成后固化,形成的模具毛坯经机械加工后能够满足表面容差 ± 0.5 mm,表面粗糙度 $R_a < 0.8 \mu\text{m}$,密封性 $< 10.1 \text{ Pa} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ ^[14]。美国某公司也选用该种材料和工艺为 B787 的一个项目制作模具^[15]。B787 选

用 Cytec 公司高温双马复合材料作为 41 段筒形件的工装。国外在复合材料模具制造方面已形成产业化, LCHU 预浸料、复合材料模具构架组件已标准化, 其技术也正在向我国推广^[16]。

国内应用复合材料模具的有: 某机型垂尾壁板复合材料工装, 它选用了美国 FIBERITE 公司的新型碳纤维复合材料预浸料作为基本材料, 使用该工装已生产出德国 MBB 公司订购的 A320 机型 3 号前缘壁板等复合材料制件, 所生产制件完全达到了工程要求^[13]。此外, ARJ21 的雷达罩模具, 某型直升机尾段模具以及某些航天单位的一些复合材料模具等均使用了纤维增强复合材料作为模具的基本材料^[17]。

我国复合材料模具的应用量较少, 复合材料模具还未得到广泛推广, 很多企业在设计和制造精度要求很高的复合材料部件时首选的模具材料仍为低碳钢, 造成了大量零部件因尺寸不合格而报废。这种现状的主要原因是缺乏富有经验的复合材料模具设计和制造人员, 缺乏专业配套的复合材料成型模具原材料, 特别是认识和观念上的误区造成了对现有金属模具成型工艺的长期依赖, 使我国在复合材料工装的设计、制造及使用上与国外相比还存在很大差距。

4 纤维增强复合材料模具的发展趋势

(1) 提高模具成型精度

纤维增强复合材料模具成型后型面一般不需要再做加工使其满足零件成型精度要求, 这需要对材料的性能及成型工艺深入了解, 提升模具的设计制造水平, 以保证固化后型面精度。对于可进行表面加工的复合材料模具, 需要对其加工设备及参数详细了解, 以满足型面高精度的需求。

(2) 延长模具使用寿命

纤维增强复合材料模具使用寿命较短, 在高温下反复固化容易出现裂纹; 且在搬运或者使用过程中易发生碰撞或划伤而导致模具损坏和真空泄漏。根据操作经验, 可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, 以解决真空泄漏问题^[8]。纳米技术对工装的耐久性提升有显著作用, ACG 公司与 Integran 公司合作, 采用纳米技术在复合材料工装的

工作面镀上一层 Invar, 研制出了 Carbovar 工装, 该工装概念结合了复合材料工装的轻质、低热量和金属工装的表面耐久性、硬度, 并且与所有金属工装相比十分节约成本。使用此项技术制造的空客 A320 翼身整流罩验证工装获得了 2011 年 JEC 装备创新奖, 如图 4 所示^[14,18]。

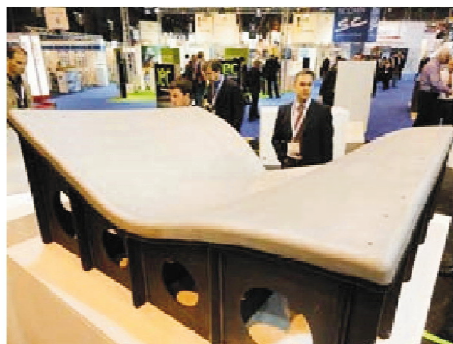


图 4 A320 翼身整流罩的 Carbovar 验证工装

Fig. 4 Carbovar demonstrate mould for A320 fuselage fairing

短切纤维的应用也有利于保证模具的气密性, Hexcel 公司的高性能模具复合材料 HexTool 中的纤维是短切碳纤维, 其制作更方便, 模具的气密性更好, 而且可以使用大丝束碳纤维, 更为经济^[19]。

(3) 降低模具制造成本

复合材料模具由母模翻制而成, 一个母模成型的模具数量越多, 则分摊在每个模具上的母模制造费用就越少, 制造成本就越低。国外正在研发性能更好、更容易加工、价格更为低廉的新型母模材料, 同时更新母模设计概念, 使其在维持精确度和长期稳定性的同时进一步缩短生产周期, 降低制造成本^[16-17]。例如 ACG 公司开发了 TB750 和 TB720 新一代环氧工装板, 与 TB620 和 TB650 相比, 在不降低产品性能的前提下将工装板的成本降低了 6%~12%, 大大降低了工装制作成本。

5 结束语

(1) 纤维增强复合材料用作模具材料具有独特的优势, 适用于成型型面复杂、精度要求高的大型复合材料零件。

(2) 模具用纤维增强复合材料主要是中低温固化高温使用的预浸料。

(3) 在国外, 模具用纤维增强复合材料已经形

成产业化趋势,纤维增强复合材料模具得到了较广泛的应用,但是在国内的应用较少,亟需对此开展研究与实践。

(4) 纤维增强复合材料模具正朝着提高成型精度、延长使用寿命、降低成本的方向发展。

参考文献

- [1] 何颖,蔡闹峰,赵鹏飞. 热压罐成型中温固化复合材料模具[J]. 纤维复合材料, 2006, 58(1): 58-59.
He Ying, Cai Wenfeng, Zhao Pengfei. Moderate-temperature cured composite moulds used for manufacturing autoclaves[J]. Fiber Composites, 2006, 58(1): 58-59. (in Chinese)
- [2] 田嘉生,王枫. 复合材料制件成形用模具材料研究[J]. 沈阳航空工业学院学报, 1997, 14(2): 34-37.
Tian Jiasheng, Wang Feng. Study on materials for composites part forming mould[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 1997, 14(2): 34-37. (in Chinese)
- [3] 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(增刊): 13-15.
Wang Yonggui, Liang Xianzhu, Wang Wei. Development tendency of molding and tooling technology in advanced composites component [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(S1): 13-15. (in Chinese)
- [4] 李青禄,胡笛川. 因瓦合金的特性及应用前景[J]. 机械管理开发, 2007(12): 34-35.
Li Qinglu, Hu Dichuan. Invar alloy's character and application prospect[J]. Mechanical Management and Development, 2007(12): 34-35. (in Chinese)
- [5] 黄钢华,张冬梅,晏冬秀,等. Invar钢模具制造工艺研究[J]. 航空工程进展, 2011, 4(2): 485-488.
Huang Ganghua, Zhang Dongmei, Yan Dongxiu, et al. Manufacturing technology research on Invar steel mould [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 4(2): 485-488. (in Chinese)
- [6] 岳广全,张博明,杜善义,等. 模具对热固性树脂基复合材料固化变形的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(5): 62-65.
Yue Guangquan, Zhang Boming, Du Shanyi, et al. Influence of the mould on curing induced shape distortion for resin matrix thermosetting composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2010(5): 62-65. (in Chinese)
- [7] 晏冬秀,刘卫平,黄钢华,等. 复合材料热压罐成型模具设计研究[J]. 航空制造技术, 2012(7): 49-52.
Yan Dongxiu, Liu Weiping, Huang Ganghua, et al. Design study for composites autoclave forming mould[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(7): 49-52. (in Chinese)
- [8] 阎龙,史耀耀,段继豪. 先进树脂基复合材料制造技术综述[J]. 航空制造技术, 2011(3): 55-58.
Yan Long, Shi Yaoyao, Duan Jihao. Review of manufacturing technology for advanced resin-matrix composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(3): 55-58. (in Chinese)
- [9] 汪少敏,过梅丽,殷立新,等. LTM树脂及其复合材料的初步研究[J]. 复合材料学报, 2002, 19(2): 28-32.
Wang Shaomin, Guo Meili, Yin Lixin, et al. Preliminary study on LTM resin and composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, 19(2): 28-32. (in Chinese)
- [10] 白树城. 用常规预浸料制造复合材料模具技术探索[J]. 航空材料学报, 2003(增刊): 284.
Bai Shucheng. The investigation of composite mould manufacturing technique by using normal prepregs [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003(S1): 284. (in Chinese)
- [11] 沈开猷. 不饱和聚酯及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1992.
Shen Kaiyou. Unsaturated polyester and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1992. (in Chinese)
- [12] 由井浩. 复合材料[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1988.
You Jinghao. Composite materials [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Press, 1988. (in Chinese)
- [13] 黄侠. 新型碳纤维预浸料在工装制造中的应用[J]. 航空维修与工程, 1994(3): 22-24.
Huang Xia. Application of new carbon fiber prepreg in manufacturing tool [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 1994(3): 22-24. (in Chinese)
- [14] 刘亚威. 航空航天复合材料制造工装的最新发展[C]//第17届全国复合材料学术会议论文集, 2012: 734-738.
Liu Yawei. Latest development of aerospace composite manufacturing tooling [C] // The Symposium of the 17th National Composite Academic Conference, 2012: 734-738. (in Chinese)
- [15] 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.
Zhou Rui. Exploiture and application of adanced mould in producing composites [C] // The Symposium of the 17th Fiber Reinforced Plastics/Composites Annual Academic Meeting, 2008: 209-211. (in Chinese)
- [16] 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.
Bai Shucheng, Qu Jianzhi, Wang Qinghai. Investigation of low price advanced composite mould design and manufacturing technique [C] // The Symposium of the 16th Fiber Reinforced Plastics/Composites Annual Academic Meeting, 2006: 182-183. (in Chinese)
- [17] 章令晖,李甲申,韩宇,等. 复合材料成型模具研究进展[J]. 航天制造技术, 2013, 2(1): 13-17.

- analysis of an aircraft with inflatable wing[J]. Flight Dynamics, 2007, 25(4): 77-85. (in Chinese)
- [15] Zhang Juntao, Hou Zhongxi, Guo Zheng, et al. Analysis and flight test for small inflatable wing design[C]//International Conference on Aerospace, Mechanical, Automotive and Materials Engineering (ICAMAME), Rome, Italy, 2012.

设计。

李 玲(1974—),女,高级工程师。主要研究方向:飞行器设计。

郭 正(1974—),男,教授,博导。主要研究方向:流体力学、空气动力学。

张俊韬(1986—),男,博士研究生。主要研究方向:飞行器设计。

作者简介:

陈立立(1990—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器

(编辑:赵毓梅)

(上接第 17 页)

- Zhang Linghui, Li Jiashen, Han Yu, et al. The progress of research on composite forming mould[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013, 2(1): 13-17. (in Chinese)
- [18] 上海沥高科技有限公司. 先进复合材料工装的应用分析[J]. 航空制造技术, 2011(15): 100-101.
Shanghai Leadgo-tech Corporation Ltd., Situation and development of application analysis of advanced composite tooling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(15): 100-101. (in Chinese)
- [19] 陆雄兵. 复合材料在航空部件制造中的新亮点[J]. 航空制造技术, 2008(1): 100-102.
Lu Xiongbing. The new application of composite in aeronautical parts manufacture [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(1): 100-102. (in Chinese)

作者简介:

王 霖(1984—),女,硕士,工程师。主要研究方向:复合材料成型模具。

苏佳智(1983—),男,硕士,工程师。主要研究方向:复合材料制造工艺。

晏冬秀(1976—),女,高级工程师。主要研究方向:复合材料成型模具、修理。

刘卫平(1963—),男,研究员。主要研究方向:复合材料制造工艺、无损检测等。

(编辑:马文静)