

大尺寸大厚度复合材料梁外形精确控制技术

王菲, 杨博, 陈永清, 陈静

(中航复合材料有限责任公司, 北京 101300)

[摘要] 大型复合材料零件的外形精度是其成型工艺的难点, 针对大尺寸大厚度复合材料梁的结构特点, 研究了影响大型复合材料 U 型梁外形精度的因素, 通过精确的热膨胀补偿、回弹补偿和厚度控制等工艺方法对主要影响因素加以控制, 实现了对大尺寸大厚度复合材料梁外形的精确控制。

关键词: 大尺寸; 大厚度; 复合材料梁; 外形精度

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.15.087



王菲

中航复合材料有限责任公司工程师, 主要从事树脂基复合材料成型工艺研究工作。

随着复合材料在飞机主承力构件上的应用逐渐加深, 复合材料制件的尺寸越来越趋于大型化、整体化^[1], 大尺寸、大厚度的零件越来越多, 零件几何尺寸的增大带来了一系列新的问题, 如热膨胀、固化变形、制件厚

度等因素对制件外形的影响变得不容忽视。梁类零件做为飞机结构的骨架零件, 装配工序对梁类零件外形尺寸有较高的要求, 大型复合材料制件的成型精度成为其制造的关键技术。

目前复合材料制件成型精度的研究工作主要集中在对固化变形的预测和控制。贾丽杰^[2], 唐占文等^[3]提出了针对大型复杂结构固化变形多层次预报技术。Sarrazin^[4]、Andrew^[5]、张纪奎^[6]等研究了固化变形的影响因素。Jung^[7]依据经典层合板理论和有限元分析来预测回弹变形。党嘉立^[8]对复合材料角形材结构的固化变形进行了研究。陈晓静^[9]、李桂东等^[10]提出了基于有限元方法的复合材料构件热压罐成型变形预测方法和基于构件型面节点变形的工装型面补偿算法, 其缺点是模型复杂、输入参量多, 并不方便直接指导工程设计与制造。晏冬秀等^[11]在大量工程经验的基础上总结出了模具热膨胀补偿和回弹角补偿等工装设计原则, GFG 公司采用经验的方法在

复合材料工形梁模具的缘条型面上加入修正值(约 1°)以抵消构件回弹^[12], 韩培培等^[13]依据生产经验取 1° 回弹补偿角以保证 U 形梁的尺寸精度, 均依赖经验数据, 很难给出准确的回弹值。

本文以大尺寸大厚度复合材料 U 型梁为研究对象, 从工程实际应用出发, 通过典型试验, 结合数值分析, 系统研究影响大尺寸大厚度复合材料 U 型梁外形精度的因素, 通过对主要影响因素的精确测算和合理控制, 实现对大尺寸大厚度复合材料梁外形的精确控制。

复合材料梁结构介绍

某大尺寸复合材料梁截面为 U 形, 长约 7.8m, 腹板高度约 720mm, 左、右缘条宽度 120mm, 厚度变化跨度大, 从 5.68mm 到 17.12mm, 变厚台阶多达 76 处, 变厚坡度大。使用的材料为高温环氧增韧单向带预浸料 CCF300/BA9916-II 和织物预浸料 CF3031/BA9916-II 两种类型, 其铺层比例如表 1 所示。

表1 复合材料梁铺层比例

铺层角度 / (°)	单向带预浸料层数	织物预浸料层数
0	40	10
90	4	
45	6	34
-45	6	

复合材料梁外形的影响因素

影响复合材料梁型面的因素有模具的型面偏差、制件的厚度偏差、制件的热膨胀偏差和制件的回弹变形等。复合材料梁制件的型面偏差计算公式为：

$\Delta_{外} = \Delta_{模具} + \Delta_{热膨胀} + \Delta_{回弹} + \Delta_{厚度}$ (1)
 式中, $\Delta_{外}$ 为制件的外形偏差, $\Delta_{模具}$ 为模具的型面偏差, $\Delta_{热膨胀}$ 为制件的热膨胀偏差, $\Delta_{回}$ 为制件的回弹变形偏差, $\Delta_{厚度}$ 为制件的厚度偏差。

复合材料的成型模具通常为刚性模具,采用数控加工,误差较小,型面偏差一般可控制在 $\pm 0.15\text{mm}$ 的范围内,因此,对制件型面的影响较小。

对大尺寸大厚度的梁类零件来说,制件的厚度偏差、热膨胀偏差、回弹变形偏差对型面公差的影响较大,需要重点加以控制。

式(1)可简化为:

$$\Delta_{外} = \Delta_{热膨胀} + \Delta_{回弹} + \Delta_{厚度} \quad (2)$$

复合材料梁外形的精确控制

1 热膨胀控制

复合材料固化成型要经历一个升温-降温的温度历程,在此过程中如果复合材料制件与成型模具的热膨胀量不一致时,最终成型的制件外形尺寸就会有偏差,零件几何尺寸越大,这种热膨胀不一致引起的制件外形偏差越大,必须要加以控制。

1.1 线性热膨胀系数试验测试

根据热膨胀计算公式,热膨胀量 ΔL 为:

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T, \quad (3)$$

式中, α 为材料线性热膨胀系数, L 为制件尺寸, ΔT 为固化温度和室温的差值。

由式(3)可知,不同材料的热膨胀量主要由其线性热膨胀系数决定。复合材料是一种可设计、多向异性的特殊材料,不同的纤维类型、铺层角度,其线性热膨胀系数也有所不同。复合材料制件的线性热膨胀系数受材料、厚度、铺层角度等因素综合影响。

本文通过试验方法来对典型铺层、典型厚度的线性热膨胀系数进行测试,选择了 6.34mm、8.66mm、10.6mm 3种典型厚度,选取梁典型铺层方式,制作层压板,测试了在

10.6mm 层压板 0° 方向和 90° 方向的线性热膨胀系数,试验结果如图 1 所示。分析图 1 (a) 和图 1 (b):

(1) 0° 方向和 90° 方向的线性热膨胀系数有着显著的差异,在 10.6mm 厚度层最大相差 $8.98 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,分析其铺层比例,0° 铺层占比最大,而碳纤维的线性热膨胀系数远小于环氧树脂基体,所以 0° 方向的线性热膨胀系数远小于 90° 方向。因此,在热膨胀补偿时 0° 方向和 90° 方向根据线性热膨胀系数分别计算补偿量;

(2) 不同厚度层板的线性热膨胀系数不同,10.6mm 厚度层与 6.34mm 厚度层最大相差 $3.41 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,分析不同厚度层板,其铺层比例有所差异,导致线性热膨胀系数的不同。因此,厚度变化较大的制件需要考虑不同厚度的综合影响。

1.2 热膨胀精确补偿

复合材料的热膨胀对制件外形的影响可以通过合理的工艺补偿来予以消除。

根据热膨胀计算公式,可推导出一个热膨胀补偿系数:

$$\mu = \frac{1}{(\alpha_M - \alpha_p) \times \Delta T + 1}, \quad (4)$$

式中, μ 为补偿系数, α_M 为模具的热膨胀系数, α_p 为复合材料制件的热膨胀系数, ΔT 为固化温度和室温的差

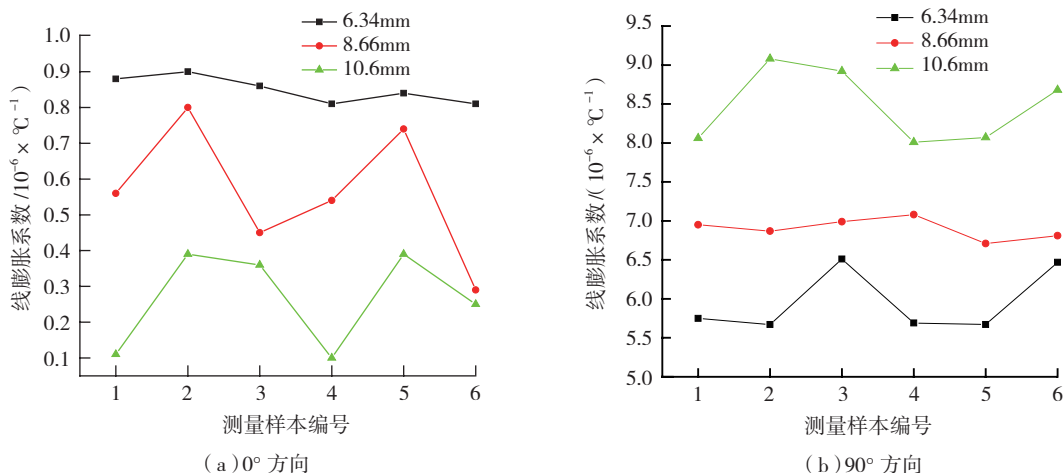


图1 0° 和90° 方向

Fig.1 Linear thermal expansion coefficients of 0° and 90°

值^[13]。

根据试验测试结果及经验数据, 可得出热膨胀偏差的精确工艺补偿方法: 沿铺层的 0° 和 90° 两个方向将产品数模分别按相应的补偿系数进行缩放处理, 缩放中心点选取产品的质量中心, 根据缩放后的数模研制产品, 即可消除热膨胀偏差对制件外形的影响。

1.3 试验验证

按照上述工艺补偿方法研制复合材料梁全尺寸件, 测量了制件长度(即铺层的 0° 方向)和宽度(即铺层的 90° 方向)方向的实际尺寸, 测量数据如表 2 所示。制件长度方向尺寸偏差 0.48mm, 宽度方向尺寸偏差 -0.22~0.20mm, 尺寸偏差较小。试验结果表明, 该补偿方法可有效解决大尺寸复合材料构件的热膨胀问题, 使得大型制件外形的精确控制成为可能。

2 回弹变形控制

复合材料固化过程的热效应和化学反应导致层板内部存在残余应力, 在固化后应力释放引起零件变形, 梁类结构的缘条回弹变形尤其明显, 影响外形精度和装配连接。对于大厚度的复合材料梁类构件, 由于其自身刚度较大, 回弹变形难以矫正, 对外形的影响极大。

复合材料的回弹变形量用回弹角来表征, 回弹角的影响因素有材料参数、铺层方式、制件厚度等, 一般可通过试验测试和模拟计算得到^[13]。

2.1 回弹角试验测试

针对 U 型梁结构, 选取其简化模型, 进行 L 型层板回弹角测试试验(图 2), 试验件尺寸为 200mm × 80mm × 180mm。选择第 2 种铺层方式, 制作了 6.34mm、8.66mm、10.6mm 这 3 种不同厚度的对比试验件, 用三坐标测量了试验件的回



图2 回弹角测试中L型层板试验件

Fig.2 L-shaped laminate of spring-back angle test

弹角, 测试结果如图 3 所示。选择 6.34mm 厚度, 制作了 3 种不同铺层方式的对比试验件, 测量了试验件的回弹角, 测试结果如图 4 所示。

分析图 3 和图 4 可知:

(1) 相同铺层方式、不同厚度的试验件其回弹角不同, 随着试验件厚度的增加, 回弹角逐渐变小, 最大相差 0.133° ;

(2) 相同厚度、不同铺层方式的试验件其回弹角也不同, 最大相差 0.1° 。

2.2 回弹角修正

采用数值模拟方法可计算复合材料梁的回弹角, 对大尺寸大厚度复合材料梁来说, 不同的厚度区域回弹角不同, 铺层方式的不同也会引起回弹角的差异, 单纯依靠试验测试或模拟计算都难以得到准确的回弹角。将试验测试和模拟计算相结

表2 复合材料梁尺寸测量数据

mm

尺寸	理论值	不补偿实测值	不补偿的偏差	补偿后实测值	补偿后的偏差
制件总长度	7741.16	7754.91	13.75	7741.64	0.48
3 肋处宽度	709.67	710.36	0.69	709.85	0.18
6 肋处宽度	720.20	720.80	0.60	719.98	-0.22
9 肋处宽度	722.20	722.78	0.58	722.06	-0.14
12 肋处宽度	722.20	722.64	0.44	722.40	0.20
15 肋处宽度	707.42	707.75	0.33	707.56	0.14

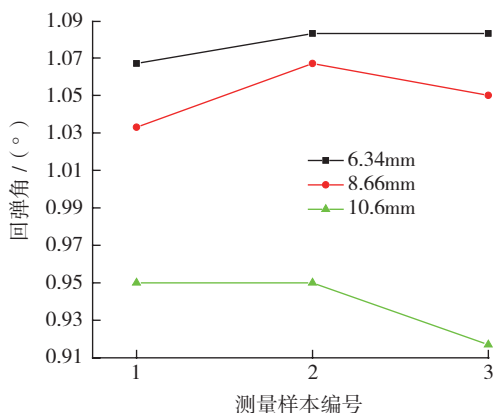


图3 典型铺层不同厚度的回弹角比较

Fig.3 Comparisons of spring-back angle of different kinds of thickness with typical stacking sequence

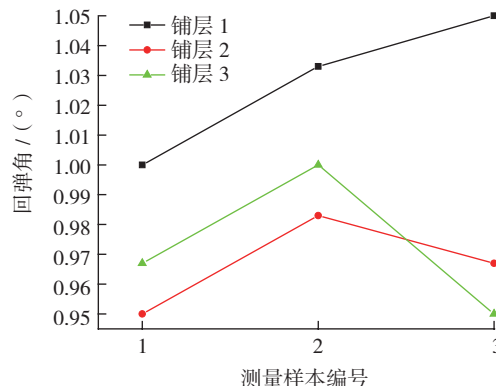


图4 典型厚度不同铺层方式的回弹角比较

Fig.4 Comparisons of spring-back angle of different stacking sequences with typical thickness

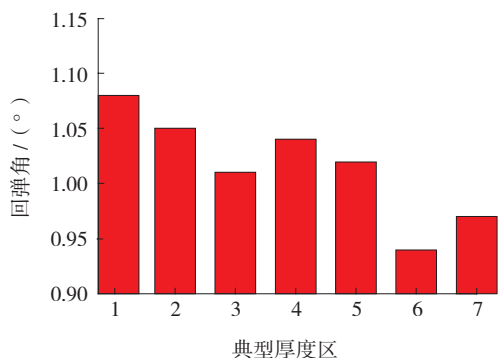


图5 某复合材料梁典型厚度区回弹角修正结果

Fig.5 Revising values of spring-back angle on typical thickness areas of composites spar

合,利用试验测试得出典型铺层、典型厚度的回弹角,对模拟计算结果进行修正,可得到更精确的回弹角^[14]。图5给出了复合材料梁典型厚度区(6.34~17.12mm)的回弹角修正结果。按照回弹角修正值对梁不同厚度区的缘条型面分别进行工艺补偿,即可抵消回弹变形对梁外形尺寸的影响。

2.3 试验验证

按照上述回弹补偿方法研制复合材料梁全尺寸件,测量了制件左、右侧缘条的回弹角,测量数据如图6所示,回弹角实测值与修正结果一致性较好,经工艺控制,回弹角可控制在 $\pm 0.1^\circ$ 的范围内。试验结果表明,通过合理的工艺补偿,回弹变形对复合材料梁外形的影响可精准控制。

3 厚度控制

3.1 预浸料厚度控制

目前国内外高性能树脂基复合材料以热熔法预浸料为主,其优点是“零吸胶”,因此,预浸料的厚度直接决定了成型后制件的厚度,而影响预浸料厚度的主要因素是纤维面密度和树脂含量^[10]。因此,严格控制生产过程中预浸料的纤维面密度偏差和树脂含量偏差,即可有效控制制件的厚度偏差。

3.2 预浸料优化使用

在工业化生产中,由于碳纤维和预浸料生产设备的精度误差,生产出来的预浸料树脂含量和纤维面密度在一定的范围内波动,导致预浸料的厚度也有所波动。利用预浸料厚度的波动,将不同厚度的预浸料合理搭配,可精准控制制件的最终厚度。

工程实际应用时可对预浸料

抽样进行厚度测试,每卷预浸料(以 100m^2 计)首、尾各截取 0.5m^2 压制层压板,固化后计算平均单层厚度。因单卷预浸料的厚度波动范围有限,此厚度可近似准确地表征该卷预浸料的厚度实际值。对厚、薄不同的预浸料进行合理组合、优化使用,制件的厚度偏差可控制在 $\pm 1.5\%$ 以内,有利于制件的外形精确控制。

4 外形精确控制结果试验验证

按照上述精确控制外形尺寸的方法研制复合材料梁全尺寸件,使用激光跟踪仪测量了梁左、右侧缘条的外形面,制件的型面偏差可控制在 $-0.4\sim 0.15\text{mm}$,满足设计、装配对产品外形公差的要求。这说明合理的控制热膨胀偏差、回弹变形偏差和厚度偏差3个因素,可实现对大尺寸大厚度复合材料梁外形的精确控制(图7)。

结论

大尺寸大厚度复合材料梁的外形尺寸受制件的热膨胀偏差、回弹变形偏差、厚度偏差3个因素综合影响。

(1)热膨胀偏差受制件的厚度、铺层角度影响显著,沿铺层 0° 方向和 90° 方向对制件分别按相应的补偿系数进行缩放可消除热膨胀的影响;

(2)回弹角的大小与制件的厚度、铺层方式密切相关,通过模拟计

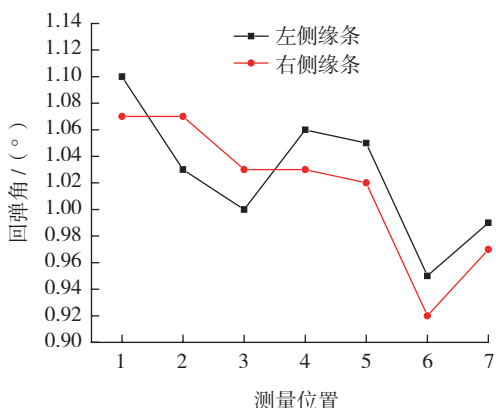


图6 复合材料梁左、右缘条回弹角测量结果

Fig.6 Measurements of spring-back on left flange and right flange of composites spar

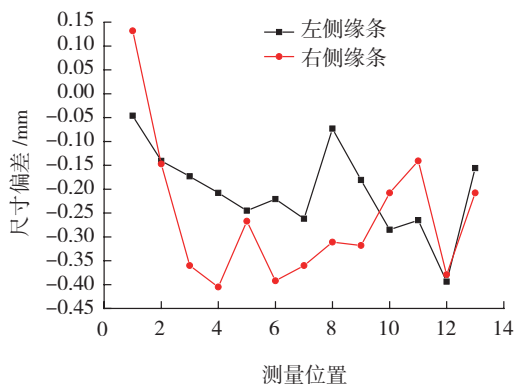


图7 复合材料梁缘条型面偏差

Fig.7 Deviation of flange shape of composites spar

算结合试验测试修正,可得到精确的回弹角;

(3)在生产时严格控制预浸料的厚度,优化预浸料使用方式,可减小厚度波动,精确控制制件厚度。

通过采取合理的工艺措施对上述3个主要影响因素加以精确控制,实现了对大尺寸大厚度复合材料梁外形的精确控制,相关技术适合工程化应用。

参考文献

- [1] 杨博,王菲,陈永清,等.大尺寸复合材料翼梁的制造技术发展[J].航空制造技术,2013(22):74-76.
YANG Bo, WANG Fei, CHEN Yongqing, et al. Development of manufacturing technology in large composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(22):74-76.
- [2] 贾丽杰,魏冉,晏冬秀.热固性复合材料结构固化回弹变形研究进展[J].航空制造技术,2013(S2):104-107.
JIA Lijie, WEI Ran, YAN Dongxiu. Study progress of curing-induced springback for thermosetting composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(S2):104-107.
- [3] 唐占文,张博明.复合材料设计制造一体化中的固化变形预报技术[J].航空制造技术,2015(15):32-37.
TANG Zhanwen, ZHANG Boming. Prediction of curing deformation in integrated design and manufacture of composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(15):32-37.
- [4] SARRAZIN H, KIM B, AHN S H. Effects of processing temperature and layout on springback[J]. Journal of Composite Materials, 1995, 29(10):1278-1294.
- [5] JOHNSTON A A. An integrated model of the development of process-induced deformation in autoclave processing of composite structures[D]. Fredericton: The University of New Brunswick, 1992.
- [6] 张纪奎,酆正能,关志东,等.热固性树脂基复合材料固化变形影响因素分析[J].复合材料学报,2009,26(1):179.
ZHANG Jikui, LI Zhengneng, GUAN Zhidong, et al. Analysis on influences factors of curing deformation of thermoset composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2009, 26(1): 179.
- [7] JUNG W K, CHU W S, AHN S H. Measurement and compensation of spring-back of a hybrid composite beam[J]. Journal of Composite Materials, 2007, 41(7): 851-864.
- [8] 党嘉立.复合材料角型结构固化变形研究[J].宇航材料工艺,1993(5):10-12.
DANG Jiali. Study of Curing deformation for L-shape structure composite[J]. Aerospace Materials Technology, 1993(5): 10-12.
- [9] 陈晓静.复合材料构件固化成型的变形预测与补偿[D].南京:南京航空航天大学,2011.
CHEN Xiaojing. Prediction and compensation of curing deformation of composite component[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [10] 李桂东.复合材料构件热压罐成型工装设计关键技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2010.
LI Guidong. The key technology research of composites part autoclave processing tool design[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [11] 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.
- [12] 韩培培,孟庆杰.复合材料U形梁成型模具设计[J].玻璃钢/复合材料,2015(3):73-77.
HAN Peipei, MENG Qingjie. Design of composite component mold for U-shape girder[J]. FRP/Composites, 2015(3):73-77.
- [13] 王菲,杨博,陈永清,等.大尺寸复合材料翼梁的研制[J].航空制造技术,2015(S1):55-60.
WANG Fei, YANG Bo, CHEN Yongqing, et al. Manufacturing of large scale composites spar[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(S1):55-60.
- [14] 贾丽杰,魏冉,杨霓虹,等.复合材料C形结构的回弹变形研究[J].航空制造技术,2013(23):121-130.
JIA Lijie, WEI Ran, YANG Nihong, et al. Study of spring-back for C-section composites part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(23):121-130.
- [15] 杨博,陈永清,曹正华.大厚度碳纤维复合材料层压板的试制[J].航空制造技术,2009(S1):73-74.
YANG Bo, CHEN Yongqing, CAO Zhenghua. Trial production of large thickness composites laminate of carbon fiber[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(S1):73-74.

Precise Shape Control Technology of Large Scale and Heavy Section Composites Spar

WANG Fei, YANG Bo, CHEN Yongqing, CHEN Jing

(AVIC Composite Co. LTD., Beijing 101300, China)

[ABSTRACT] The difficulty of manufacturing large scale composite component is shape precision, according to the structure feature of large scale and heavy section composites spar, the influence factors on shape precision of large scale composite component have been researched. With the technology methods such as thermal expansion compensation, spring-back compensation and thickness control, the primary influence factors of shape precision have been accurately controlled. The purpose of accurate controlling shape precision of large scale and heavy section composites spar have been achieved.

Keywords: Large scale; Heavy section; Composites spar; Shape precise

(责编 大漠)