

# 复合材料热压罐固化工艺研发试验设计与适航验证\*

吴利华<sup>1</sup>, 张 婷<sup>2,3</sup>

- (1. 上海飞机设计研究院, 上海 201210;  
2. 中国航发商用航空发动机有限责任公司设计研发中心, 上海 200241;  
3. 上海商用飞机发动机工程技术研究中心, 上海 200241)

**[摘要]** 叙述了复合材料热压罐固化工艺研发试验的制定依据和实施过程要求, 重点介绍了复合材料热压罐固化工艺的材料、采样、关键工艺参数和测试项目的选择, 对制造过程的下料、铺贴、机加和无损检测要求进行分析, 明确了试验方案各环节的控制要求, 并对复合材料热压罐固化工艺研发试验设计、工艺规范的建立以及对产品质量和形成的工艺规范的适航验证方法进行了阐述。对于工艺规范的适航验证, 其工艺的稳定性是验证的重点, 可以通过具有代表性的试片级、元件级试验件进行试验。

**关键词:** 复合材料; 热压罐工艺; 工艺研发; 关键参数; 试验设计; 适航验证

## Testing Design and Airworthiness Verification for Composites Autoclave Curing Process

WU Lihua<sup>1</sup>, ZHANG Ting<sup>2,3</sup>

- (1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China;  
2. Department of Discipline Engineering, AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China;  
3. Shanghai Engineering Research Center of Civil Aero Engine, Shanghai 200241, China)

**[ABSTRACT]** This paper describes the formulated basis and theplementary requirements for a composite autoclave curing process research plan, emphasis on the selecting of the materials, sampling, critical process parameter and testing items. This paper also specifies the critical control requirements for the cutting, plying, machining and non-destructive testing requirements during the fabrication and analyzes the influence of above factors on the quality of final composite parts, meanwhile introduces the experimental design for the composites autoclave curing process and the establishment of process specification. Finally, the paper introduces the product quality-keeping method and airworthiness verification method for composite parts fabrication process. For the airworthiness verification of composite process specifications, the stability of the process is the key point, which can be tested by using representative test panel and components.

**Keywords:** Composites; Autoclave process; Process research; Key parameter; Testing design; Airworthiness verification

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.19.092

复合材料制件的性能与固化及工艺过程息息相关, 并对工艺过程的变化非常敏感, 而航空制品除了对质量提出了要求, 对产品性能的稳定性同样要求严格, 往往需要通过过程控制来保证制件最终的质量和性能稳定性。工艺规范是一种被用来控制复合材料变异的有效过程控制方法<sup>[1]</sup>。

但是, 如何在工艺研发阶段选择合适的试验矩阵, 识别出关键力学性能, 并经济有效地验证这些性能, 确定工艺窗口, 指导制定出有效可行的工艺规范, 是工艺研发阶段必须认真思考和重点关注的。另外, 对于工程

\* 基金项目: 上海市科委课题(18DZ2204600)。

研制过程, 以统计为基础的标准化性能数据往往也是必不可少的, 这可以帮助指导后期批量制造并保证制件的质量稳定性, 并为工艺规范的编制和适航验证提供基础。本文将大型客机上使用的复合材料作为案例, 对复合材料热压罐固化工艺研发、试验设计及形成的工艺规范的适航验证进行探讨<sup>[1]</sup>。

## 1 试验设计

### 1.1 试验材料

复合材料工艺研发试验通常是在设计选材已经确定的前提下进行, 并需要兼顾研发成本, 试验目的是进

一步地认识工艺变量如何影响材料行为,从而确定工艺控制要求。目前我国民用客机上选用了3种树脂体系的预浸料,故工艺研发需要对这几种树脂体系的预浸料分别进行完整的研发试验,获得每种预浸料的工艺特性,确定合理的材料固化工艺窗口。

### 1.2 采样方法

根据 DOT/FAA/AR—03/19《聚合物基复合材料体系的材料取证与等效》<sup>[2]</sup>文件,用于材料鉴定的试样数量根据材料的用途而定。当设计中存在超静定载荷路径时,可使用B基值(B基值的含义为95%置信度下,概率为90%);当设计中存在单一载荷路径时,则必须采用A基值(A基值的含义为95%置信度下,概率为99%)。A基值和B基值都有各自的采样数量和方法。

由于材料工艺性研究必须以统计数据为基础,但又不涉及设计许用值的计算。因此,采用样本量最小的简化B基值采样方法。如图1所示,对于相同牌号预浸料的采样要求为3批次(本文中,预浸料批次是指由一套设备采用同批次树脂浸润同批次纤维得到的产品,有计划的停机(例如,工厂过夜关机)或短时维护是允许的),每批次采用独立的工艺循环(独立的工艺循环是指采用相同的固化参数,对2块试板分别进行固化,即这2块试板需分别进热压罐进行固化)制造2块试板,每块试板上得到3个试样,共计18个试样。

### 1.3 关键工艺参数的选择

在热压罐固化工艺过程中,与材料体系直接相关,影响制件最终性能,并可以通过设备控制的关键工艺参数有6个:升温速率、降温速率、固化温度、固化时间、固化压力和真空度,原因如下所述<sup>[1]</sup>。在实际生产过程中,通过设备将这些对制件质量有重大影响的关键工艺参

数控制在合理的变化范围内,可以保证不同结构形式制件的质量和稳定性。

#### (1) 升、降温速率的影响。

升温速率过快容易导致大型零件的温度场不均匀,造成零件内部温度梯度过大,在固化过程会产生较大的内应力,从而使制件变形、翘曲。但是,考虑到经济性和生产成本,升温速率也不能太慢。同样,降温过程是零件内应力释放的过程,降温速率过快不利于零件内应力的释放,同样容易导致零件的翘曲和变形。而兼顾生产效率和生产成本,降温速率也不能太慢。这样就涉及工艺制度的最优化问题,何时采用较大的升温速率,何时采用较小的升温速率,需要在工艺研发时予以明确。

#### (2) 固化温度与固化时间。

固化温度通常是由材料供应商在材料的研发过程中确定,但考虑到热压罐内的温度均匀性通常是 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ,如果复合材料件尺寸较大或操作不当,可能在一个零件上存在 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 的温差。因此需要在工艺研发过程中关注固化温度差在 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以内的零件的性能差异。

同时,热固性树脂的固化需要在固化温度下一段时间内完成。如果固化时间过短,树脂固化不完全,固化度偏低,将导致力学性能降低;如果固化时间过长,树脂的交联密度很大,树脂的变形能力降低,树脂开始变脆,某些性能也会下降。另外,共胶结、二次胶接工艺、结构件修理等都可能使复合材料零件经历多次工艺循环,因此需要在工艺研发过程中考虑零件固化时间的上下极限。

#### (3) 固化压力与真空度。

固化压力与真空度的作用都是使制件密实,排除低分子物(如外界引入的残留溶剂、水等,以及固化反应放出的小分子)、气泡,加速和改善树脂对纤维的浸渍,并

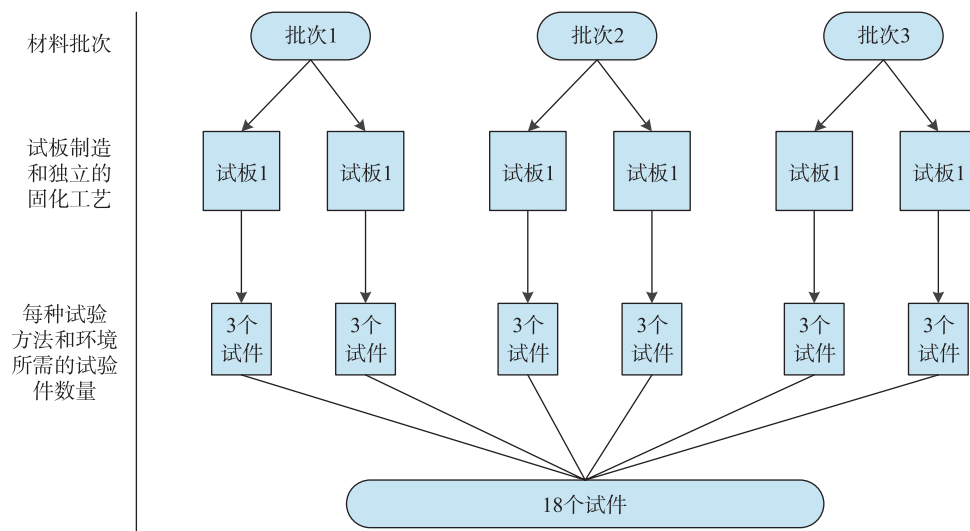


图1 缩减采样

Fig.1 Reduced sampling

控制试验件的树脂含量。环氧树脂的固化压力通常是0.6MPa,但在实际固化工程中,真空袋可能会产生轻微的漏气,但漏气还不足以导致“爆袋”,仅导致袋内压力降低,这种情况下零件质量受多大的影响,零件是否需要报废,在工艺研发阶段需要考虑。

#### 1.4 测试项目的选择

热压罐固化过程中,工艺参数的改变主要影响树脂性能,因此测试项目的选择以表征物理和树脂力学性能的变化为选择依据。如表1所示,拉伸性能通常与纤维相关,而压缩、剪切等性能通常与纤维、树脂及其形成的界面质量相关。故对环氧树脂体系推荐的性能试验通常包括:玻璃化转变温度 $T_g$ 、面孔隙率试验、压缩试验、短梁剪切强度、冲击后损伤强度。具体分析如下:

##### (1) 固化后单层厚度。

零件的厚度由铺层的层数、固化后的树脂含量,增强纤维的数量和孔洞的数量所控制。树脂、纤维和空隙的比例从一层到另一层都可能有些变化,这个变化的数值很大程度上由压实程度决定。而固化程度又由固化成型周期及其控制的好坏决定,故零件固化后的单层厚度可以有效帮助判断工艺的合理性和稳定性。

##### (2) 玻璃化转变温度 $T_g$ 。

对一个固定树脂体系,其玻璃化转变温度与固化后树脂的交联密度及分子量相关。一般而言,随着化学交联密度增加, $T_g$ 升高;分子量增加, $T_g$ 也升高;因此玻璃化转变温度能够用来表征树脂的固化程度。随着固化时间和固化温度的增加,玻璃化转变温度将进一步提高,工程上通常用玻璃化转变温度值来判断树脂的固化程度,从而判读工艺的合理性和稳定性。

##### (3) 拉伸试验。

复合材料的大多数性能与增强体和基体的相对比

例有关。在表征连续增强复合材料性能时,采用母体的部分性能变异只是由于纤维体积的局部变化,而不是由于纤维基体或基体/纤维界面性能的任何变异。对很多沿增强纤维方向测量的复合材料性能,其性能与纤维体积含量之间的关系在一定的比例范围内基本上是线性的。

在常用的“混合律”模型假设中,在0%纤维体积时单向层压板的0°拉伸强度等于基体的拉伸强度,而在100%纤维体积时等于纤维束的拉伸强度。在忽略高纤维含量时贫胶的影响下,拉伸性能与纤维体积含量在一定的树脂/纤维比例(纤维体积含量范围0.45~0.65范围内)情况下基本是线性关系,但有两个因素可能使层压板纤维体积含量产生变化:树脂含量变化和空隙体积变化。这两个变化会直接反应在拉伸性能的变化上。

##### (4) 压缩试验。

对复合材料而言,固化工艺不同,树脂会表现出不同的性能,从而对复合材料性能产生显著影响。而热固性环氧树脂基复合材料的压缩强度对树脂非常敏感,可以通过压缩试验监测纤维/基体之间的相互作用。

含冲击损伤的层压板的压缩强度能代表制造和使用过程中产生的冲击损伤对材料体系压缩强度的影响,也可以帮助判断工艺的合理和稳定性。

##### (5) 短梁剪切强度。

短梁剪切试验通常被用来考察平行纤维增强复合材料的层间(面外)剪切强度,对基体的退化敏感,可以作为材料评价的一个有价值的指标。短梁剪切仅用于定性测试,只作为筛选和质量控制,例如材料工艺的研发和控制。

##### (6) 面孔隙率试验。

孔隙通常由夹裹固化过程初期逸出的挥发份引起的。孔隙可以使固化的复合材料性能发生很大改变。固化过程中,温度的上升通常有利于孔隙的生长,为了促使孔隙的消除,必须保证树脂足够的压力。制件孔隙率的大小能够帮助判断固化过程中施加的压力及加压时机是否合适。

##### (7) 环境影响。

湿热环境对纤维控制的性能影响不大,但会明显降低基体控制的性能,如压缩强度、层间剪切等。在湿热最严重的组合条件下,可能会导致复合材料层压板的力学性能下降5%~15%左右。因此,作为周围大气环境下进行试验的补充,试验变量应包含服役中最极端温度和吸湿量条件以及长期耐久性的影响。其中温度包括低温、室温和高温,吸湿状态包括干态和湿态。环境影响和长期耐久性的评估试验对于评定与结构胶接相关的材料、工艺和界面问题特别重要。

表1 纤维和树脂性能对复合材料性能的影响

Table 1 Influence of fiber and resin on properties of composite

力学性能		复合材料主要成分	
		纤维	树脂
单向带	0° 拉伸	√	—
	0° 压缩	√	√
	剪切	—	√
	90° 拉伸	—	√
层压板	拉伸	√	—
	压缩	√	√
	面内剪切	√	√
	层间剪切	—	√

复合材料工艺性研究首先在常温干态(测试条件如表2所示)下进行,然后进行高温湿态、高温干态、低温干态的研究,得到如图2<sup>[2]</sup>所示的材料性能范围<sup>[1]</sup>。最终要在每组的工艺参数下,分别得到材料性能范围,以设计许用值为指标,从而得到满足设计许用值的工艺参数范围。

## 2 试样制造要求

试样的制造过程必须严格受控,以使试验结果有据可循。试样制造过程如果不严格,会造成最终力学数据较大的分散性,因此要特别注意以下4点<sup>[3]</sup>:

### (1) 铺贴。

性能测试试样对纤维方向要求较高,需要保证纤维方向公差在 $\pm 0.5^\circ$ 以内。同时必须严格保证铺贴过程中的纤维方向,并且标记明确,标记与实际铺贴的误差不得超过 $\pm 1^\circ$ 。

### (2) 机加。

机械加工注意避免边缘损伤,保证断面光洁度。对于平行度和垂直度在0.08mm以上(包括0.08mm)的试样,均可通过数控机加实现;而小于0.08mm的试样,则需要机加完成后在磨床上磨制以达到要求。磨床一般精度为0.03mm,而特别高精度,如压缩试样0.02mm的垂直度要求,则需要通过设计专门的磨削夹具以保证试样的制备。

### (3) 无损检测。

试样的检测主要由尺寸检测、无损检测和粗糙度检测构成。采用脉冲反射法5MHz频率对试板进行无损检测工作,记录每一试片的波高范围,并画出衰减最大的区域。在衰减最大处取样按GB3365进行孔隙率测试,若理化测定孔隙率 $<1\%$ ,由于试板其他区域的超声衰减均小于此处,可认为整个试片的孔隙含量满足小于1%要求。对于粗糙度要求,设备必须能够保证厚度1.88~7.52mm的断面粗糙度检测。

### (4) 试验件标识。

每个试样上应具有唯一的标识,并可由此标识追溯到该试样取自哪块试板、来自何批次、将做何种测试、测试条件、工艺循环。

为了增强试样的可追溯性,可在切割试样前,使用永久性记号笔在试板上画斜线(如图3<sup>[2]</sup>所示)。这样使得测试结束后,仍能分辨出试样在试板上原来所处的位置。这一点对测试结束后异常数据的追溯尤其重要。

## 3 零件制造和测试过程的质量要求

鉴于适航标准对飞机结构制造的要求和复合材料结构制造对其性能的影响特征,对复合材料结构制造提

出以下要求:

(1) 必须有获得适航认可的材料规范和工艺规范文件,这些文件的目的是以确保制造的试样具有重现性和可靠性。

(2) 通过试验验证所建立的工艺规范能够稳定、一致地制造复合材料结构。

(3) 经过验证的工艺规范提交局方并得到局方批准;适航审定中,适航局方需要确定工艺规范的最终内容,并确认有证据表明工艺规范的合理性。

(4) 按照材料规范或原材料入厂验收条件对材料

表2 试验环境

Table 2 Test circumstance

序号	环境名称	温度/°C	相对湿度(RH)/%
1	常温干态(RTD)	23 ± 3	—
2	低温干态(CTD)	-54 ± 3	—
3	高温湿态(ETW)	82 ± 3	85 ± 3

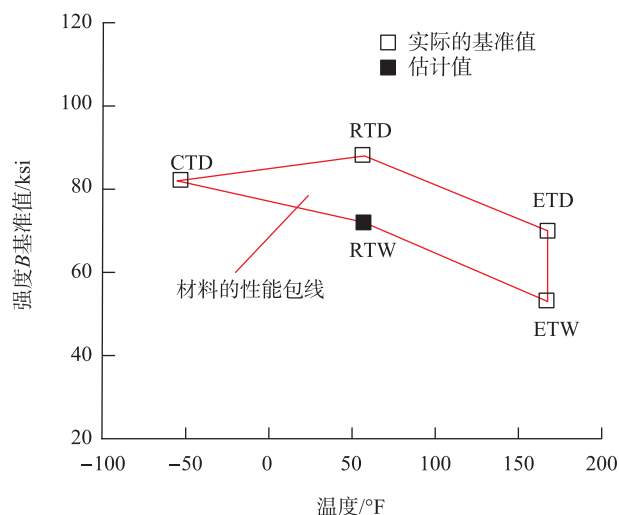


图2 材料性能范围

Fig.2 Range of materials performance

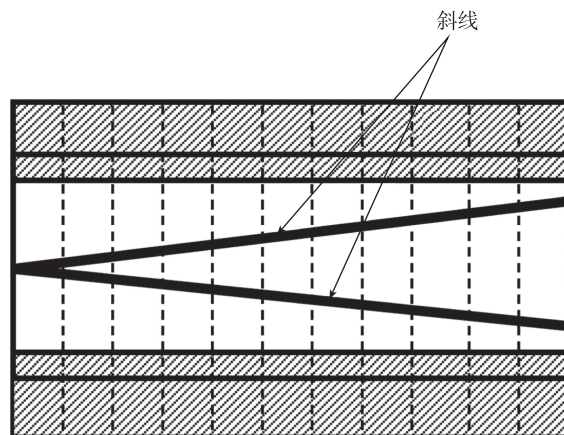


图3 试板重建用标记

Fig.3 Skewed lines drawn across subpanel used for reconstruction

进行入厂复验,并记录完整。

(5)必须严格按照相关工艺规范进行试样的制造和加工。

(6)必须严格按照验收技术条件对试样进行接收。

(7)必须保证试样的标记完整合理。要求记录:(a)所用材料的批号、卷号、出库时间、开始使用时间;如果反复进出,需要记录总计的外置时间;(b)试验件的编号、铺层方向、基准方向、进罐时间(炉次)及热压罐运行记录;(c)对每一个试样,应明确记录其使用的加工方法、刀具、设备、加工日期;(d)质量检测的偏离记录。

(8)减少试样准备和测试过程中的附加变异,严格按照 ASTM 测试标准进行测试,在测试过程中尽量将测试方法的敏感性降到最低。

## 4 复合材料类工艺规范的建立

### 4.1 指导文件

AR—02/110<sup>[4]</sup>是连续纤维增强树脂基复合材料零件制造工艺规范编制的指导性文件,文件规定了复材零件制造类工艺规范的标准格式和关注重点,提供了可接受但不是唯一的规范编制指导方法和准则。咨询通报 AC21-26<sup>[5]</sup>是复合材料结构件制造的质量控制文件,该文件从质量控制体系的角度对连续纤维增强复合材料零件的制造给予指导,提出了制造过程中需要重点关注和控制的步骤和内容。航空复合材料结构类工艺规范的编制可以参考这两份文件要求进行编制,SAE 和 AMS 规范标准板式或其他有相同内容的形式都是可以借鉴的标准格式<sup>[1,6-7]</sup>。一般而言,工艺规范的内容主要包括适用范围、适用文件、制造过程及控制要求、材料控制要求、设备和人员控制要求,质量控制标准与记录,以及储存要求或其他保护性措施等。

### 4.2 工艺规范重点控制项目

复合材料的材料属性是作为制造工艺的一部分加工成结构件的,制造工艺的细小变更都会严重影响制件的最终质量和质量稳定性,因此需要在工艺规范中明确制造过程中的关键参数并通过操作细节的详细控制来保证制件的最终性能<sup>[8]</sup>。对复合材料生产工艺而言,可能影响制件最终性能的变异源主要有以下几个方面:人员、材料、环境设施、模具、制造过程控制和检测。建议在规范中对这些项目详细规定和重点控制。

## 5 工艺规范适航验证

中国民用航空规章运输类飞机适航标准 CCAR25.605 条款<sup>[9]</sup>对飞机的制造方法提出了如下要求:

(1)使用的制造方法必须能生产出一个始终完好的结构。如果某种制造工艺(如胶结、电焊和热处理)需

要严格控制才能达到此目的,那么该工艺必须按照批准的工艺规范执行。

(2)飞机的每种新制造方法必须通过试验大纲予以证实。

对于航空复合材料零部件,CCAR25.605 的核心要求就是:零件制造需要以工艺规范为指导,制件质量能够始终稳定地满足设计要求,并且这些规范需要通过适航验证并得到适航当局的批准。

对于工艺规范的适航验证,其中工艺的稳定性 and 合理性可以通过具有代表性的试片级、元件级试验件进行试验<sup>[10-11]</sup>。一般来说,复合材料的离散系数通常在 4%~10% 之间,由单一实验室进行试样的制造和试验可以得到较低的离散系数,而较高的离散系数可以表明工艺缺少控制。通过不同批次材料之间试样性能离散度的分析可以判断工艺窗口的合理性和工艺的稳定性。通常需要比较标准和极端的固化制度(标准、最优和最差等)下试样力学性能的差异。例如考虑在最慢的升温速率、最高的固化温度、最长的固化时间和最大的固化压力下制造的试样与在最快的升温速率、最低的固化温度、最短的固化时间和最小的固化压力下制造的复合材料试样之间的力学性能差异。如果这些极端情况下制造的试样层压板结构其性能离散度控制在 8% 以内,夹层结构性能离散度控制在 10% 以内,则可以认为工艺窗口设置是合理、适用的,其工艺是稳定的。

## 6 结论

由于复合材料产品的性能与工艺过程息息相关,因此需要通过工艺规范来经济有效地控制复合材料的变异。而如何建立有效可行的工艺规范是在工艺研发阶段就需要考虑的。本文对复合材料热压罐固化工艺研发试验设计、工艺规范的建立以及适航验证进行了阐述,希望对我国复合材料在大飞机上的应用和适航审定具有一定的借鉴作用。

### 参考文献

- [1] 美国 CMH-17 协调委员会. 复合材料手册(第一卷): 树脂基复合材料结构材料表征指南[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.  
CMH-17 Coordinating Committee of the US. Composite materials handbook (Vol 1): polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2016.
- [2] TOMBLIN J S, NG Y C, RAJU K S. Material qualification and equivalency for polymer matrix composite material systems[J]. Materials, 2001, 10(4): 419-420.
- [3] HEMPE D W. Composite aircraft structured. FAA Advisory Circular AC20-107B[R]. National Technical Information Service (NTIS), 2010.

(下转第101页)

## 参考文献

[1] 赵民智, 纪丽敏, 万承军. 我国惯性仪器仪表的技术特点及发展综述[J]. 传感器世界, 2009(7): 16-19.

ZHAO Minzhi, JI Limin, WAN Chengjun. Technical characteristics and development summarization of native inertial instrument and meter[J]. Sensor World, 2009(7): 16-19.

[2] 毕胜. 国内外工业机器人的发展现状[J]. 机械工程师, 2008(7): 5-7.

BI Sheng. Development of industrial robots home and abroad[J]. Mechanical Engineer, 2008(7): 5-7.

[3] 黎田, 胡晓雪, 姚为, 等. 机器人在航天装配自动化装配中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2014, 57(21): 102-108.

LI Tian, HU Xiaoxue, YAO Wei, et al. Research on application of robot in space equipment automatic assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(21): 102-108.

[4] 杨金. 机器人在汽车车身制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2004, 47(3): 36-37.

YANG Jin. Application of robots in car body manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004, 47(3): 36-37.

[5] 金桂银, 穆建军. 视觉识别机器人在物流作业中的智能应用[J]. 制造业自动化, 2013(11): 103-105.

JIN Guiyin, MU Jianjun. Material handling application of intellectual robot with vision system[J]. Manufacturing Automation, 2013(11): 103-105.

[6] WOERN H. Flexible microrobots for micro assembly tasks[C]//IEEE International Conference of Intelligent Robots and Systems, New York: IEEE, 2000.

[7] 王晖, 滕霖, 赵宝林. 自动微装配技术在航空机载光电传感器装调中的应用[J]. 航空制造技术, 2010, 53(2): 82-85.

WANG Hui, TENG Lin, ZHAO Baolin. Application of automatic micro-assembly technology in airborne mechanical/electronic/optical sensor assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(2): 82-85.

[8] 张习文, 王晓东, 罗怡, 等. 精密微小型零件自动装配系统显微视觉的照明自动优化[J]. 光电工程, 2012, 39(4): 14-20.

ZHANG Xiwen, WANG Xiaodong, LUO Yi, et al. Automatic illumination of microscopic machine vision optimization for precision miniature parts automatic assembly system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(4): 14-20.

[9] 马立, 周辅君, 谢炜, 等. 激光陀螺合光装配中信号的稳健高斯滤波方法[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 15-20.

MA Li, ZHOU Fujun, XIE Wei, et al. Robust gaussian filtering of signals for beam-coupling assembly of ring laser gyroscopes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(10): 15-20.

[10] 马立, 欧阳航空, 谢炜, 等. 倾斜接触式调腔方法及试验研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(1): 10-17.

MA Li, OUYANG Hangkong, XIE Wei, et al. Slope-contact-type cavity adjustment method and experiment study for ring laser gyroscope[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(1): 10-17.

[11] 李占京. 激光陀螺抖动轮自动装配系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

LI Zhanjing. Research on key technologies of automatic assembly system of laser gyro dithering-wheel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[12] 罗怡, 刘宇, 王晓东. 微装配中的精密点胶分液技术[J]. 电子世界, 2014(7): 89-91.

LUO Yi, LIU Yu, WANG Xiaodong. Precise dispensing technology in micro-assembly[J]. Electronics World, 2014(7): 89-91.

通讯作者: 李占京, 硕士、工程师, 研究方向为机器人技术、激光陀螺装调工艺, E-mail: robosky@qq.com.

(责编 铃兰)

(上接第96页)

[4] BOGUCKI G, MCCARVILL W, WARD S, et al. Guidelines for the development of process specifications, instructions, and controls for the fabrication of fiber-reinforced polymer composites, FAA report: DOT/FAA/AR-02/110[R]. National Technical Information Service (NTIS), 2003.

[5] SULLIVAN W J. Quality control for the manufacture of composite structures. FAA Advisory Circular AC21-26[R]. National Technical Information Service (NTIS), 1989.

[6] WARD S, MCCARVILL W, TOMBLIN J. Guidelines and recommended criteria for the development of a material specification for carbon fiber/epoxy fabric prepregs. FAA Report: DOT/FAA/AR-06/10[R]. National Technical Information Service (NTIS), 2007.

[7] LEONELLI F, KELLER S. Research on procedures and guidance for process/repair specifications. FAA Report: DOT/FAA/AR-09/20[R]. National Technical Information Service (NTIS), 2009.

[8] 王仁龙, 谭永刚. 纤维增强复合材料零部件的制造符合性检查[J]. 航空制造技术, 2014, 57(9): 66-72.

WANG Renlong, TAN Yonggang. Conformity inspection of fiber reinforced composites parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(9): 66-72.

[9] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2016.

Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standard for aerotransport: CCAR-25-R4 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2016.

[10] 谭永刚, 张迎春. 复合材料工艺的适航审定[J]. 民用飞机设计与研究, 2014, 115(4): 58-60.

TAN Yonggang, ZHANG Yingchun. Certification of composites process[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2014, 115(4): 58-60.

[11] 李宏运. 复合材料在民机应用中有关适航问题的探讨[J]. 航空制造技术, 2009, 52(16): 26-29.

LI Hongyun. Airworthiness issues of in civil aircraft composite applied[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(16): 26-29.

通讯作者: 张婷, 博士、高级工程师, 研究方向为复合材料成型工艺、复合材料制件检测、复合材料工艺标准及适航符合性验证, E-mail: zhangting281020@163.com.

(责编 铃兰)