

纤维增强复合材料零部件的制造符合性检查

Conformity Inspection of Fiber Reinforced Composites Parts

民航上海航空器适航审定中心 王仁龙 谭永刚

[摘要] 研究了纤维增强复合材料零部件的制造符合性检查主要关注问题,结合国内某运输类飞机型号项目审查工作经验,对常见的缺陷进行了总结为开展民用航空产品复合材料零部件的制造符合性检查提供一定的借鉴作用。

关键词: 民用航空 适航 复合材料 制造符合性检查

[ABSTRACT] Provide a reference for conducting conformity inspection of fiber reinforced composite parts, some principal concerned problems on fiber reinforced composite part's conformity inspection are studied, and a checklist is given with common discrepancies that should be paid attention to.

Keywords: Civil aviation Airworthiness Composites Conformity inspection

进入 21 世纪,世界民用航空业进入了高速发展时期,世界各国都在积极地开拓这一领域,不断研制和使用新材料、新结构、新技术、新工艺,复合材料以其比强度高、比模量高、性能可设计性强、抗疲劳断裂性能好、耐腐蚀和易于整体成形复杂结构件等优点,在民用飞机上得到了广泛的应用。空客 A380 飞机复合材料用量占飞机结构重量的 24% (不含 GLARE 层),波音 787 飞机复合材料用量占据了飞机结构重量的 50%,空客正在研制的 A350 超宽体客机的复合材料用量更是提高到了 52%。此外,在通用航空领域,许多小飞机的复合材料用量更高,甚至达到了结构重量的 90% 以上,可以看出复合材料的应用已经成为民用飞机实现其先进性、经济型和舒适性的重要技术途径之一^[1-3]。

1 适航审查与制造符合性检查

航空器的适航性是指航空器能在预期的环境中安全飞行(包括起飞和着陆)的固有品质,这种品质可以通过合适的维修而持续保持。《中华人民共和国民用航空器适航管理条例》的第三条规定了“民用航空器的适航

管理,是根据国家的有关规定,对民用航空器的设计、生产、使用和维修,实施以确保飞行安全为目的的技术鉴定和监督”^[4],适航审查就是一种主要的“技术鉴定和监督”的方法。适航审查分为初始适航审查和持续适航审查。初始适航审查是国家适航当局对拟用于民用航空运输的航空器所进行的设计符合性和制造符合性审查,以确保航空器是否符合有关适航规章和环保要求。设计符合性是指民用航空产品和零部件的设计符合规定的适航规章和要求,制造符合性是指民用航空产品和零部件的制造、试验、安装等符合经批准的设计^[5-7]。纤维增强复合材料零部件的制造符合性检查就是检查和判断拟用于民用航空器上的纤维增强复合材料零部件的制造符合性。

在多数情况下,通过对实物产品的最终检测即可判断它对型号设计的符合性,但也存在很多通过对最终实物产品的检测无法判断其符合性的情况。对此,我们民用航空适航规章 CCAR25 部《运输类飞机适航标准》^[8]的第 25.605 条规定如下:

§ 25.605 制造方法(a)采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(如胶接、点焊或热处理)需要严格控制才能达到此目的,则该工艺必须按照批准的工艺规范执行。(b)飞机的每种新制造方法必须通过试验大纲予以证实。

复合材料零部件的设计和制造质量依赖于对材料和工艺的严格控制^[9],由此可见,判断其符合性,就需要采用过程检查的方法。

2 纤维增强复合材料零部件的一般制造工艺

纤维增强复合材料零部件的结构主要可以分为层压板和夹层结构,其制造工艺有很多种,纤维预浸成形是航空结构最常用的一种成形工艺。图 1 给出了纤维增强复合材料零部件的一般制造流程。

目前,国内民用飞机上复合材料结构件的材料多依赖于进口,主要形式是预浸料,即由国外供应商直接生产的制造中间体。

铺放是一道非常关键的工序,对最终产品的质量、性能指标影响非常大。目前,国内对于一些具有简单的、

* 西北工业大学研究生创业种子基金(Z2012061),陕西省教育厅科学研究计划项目(2010jk593)资助。

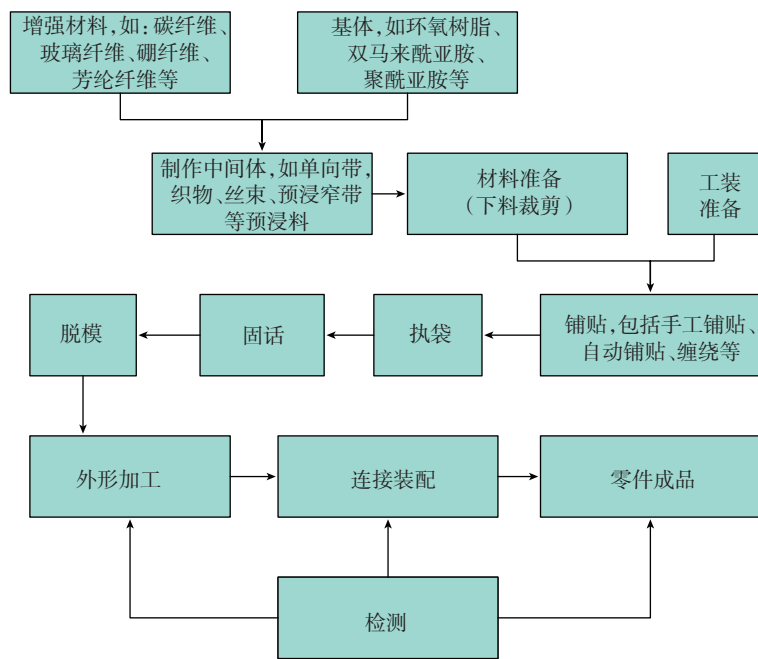


图1 纤维增强复合材料零件的一般制造流程

Fig.1 Manufacturing process for fiber reinforced composites parts

曲率小的型面外形的零件可采用自动铺放(包括带缠绕、带铺放)的方法成形,而对于型面相对比较复杂、大曲率的零部件,只能采用人工铺放的方法成形。

为使预浸料各层贴实并达到预期的力学性能,需要采取必要的措施。真空—热压罐成形是飞机结构高质量复合材料构件的主要成形方法之一。

对于经过压实、固化的复合材料零件,需要对其进行必要的机械加工(如钻孔、外形切割、修边等)和全面的质量检测(包括外观、尺寸特性检测和内部质量的无损检测),最终才能形成合格的复合材料零部件。对于一些结构复杂的零件,可采用合理分解,分别固化,最后再二次胶接成形的方法。

3 制造符合性检查的主要关注点

复合材料零部件尤其是用来承受一定载荷的结构件,其性能和质量将直接影响到飞机的安全运行。而影响复合材料零部件机械性能和质量的主要特性,如纤维方向、基体孔隙、分层、贫胶、夹杂物等,通常在产品的最终验收阶段是无法完全检测出来的。因此,需要在制造过程中对影响这些特性的操作过程进行控制。通常可从以下几个方面予以关注和控制。

(1) 人员控制。制造和检测人员应当具备相应的资质或经过有效的培训。下料人员应当熟悉材料规范的要求,充分理解产品图纸的要求,遵守操作规范。铺放人员应当经过必要的技能培训,熟悉操作规程,尤其是应当熟知产品的特殊要求。无损检测人员应当获得

相应的资格证书。

(2) 设备及设施控制。在整个纤维增强复合材料零部件的制造过程中所使用到的设备及设施,如固化设备、低温库、自动下料机、激光定位仪、热隔膜机、加热枪、热电偶、检测设备及工具等,均应满足设备及设施的使用要求和/或工艺规范的相关要求。可靠的工装是实现铺放、封装等工序可重复性的重要保障,因此工装制造应符合工装图样要求并且具有制造合格证,同时应对其进行定期的校验,根据相关工装使用要求进行热分布测试和泄漏检查等。

(3) 材料控制。根据复合材料零部件的设计要求及相关标准,对来料(包括预浸料和工艺辅助材料)的物理特性(如树脂含量、单位面积重量、挥发物含量、流动性、尺寸特性等)和化学特性(如树脂组分分析、未固化树脂的化学结构等)进行检测,采用必要的统计过程控制(SPC)方法,确保来料的有效性。

预浸料、胶粘剂、灌封料等有贮存和使用温度要求的材料按照相应的材料规范进行存储和操作,并带有适当的标签。材料的操作寿命、力学性能寿命(简称力学寿命)及贮存期(亦称贮存寿命)应满足材料规范的要求。材料的力学寿命是指材料离开冷藏器后,在操作寿命期间进行了铺层和密实处理后,能够保持规定力学性能的时间。操作寿命是指材料离开冷藏器后,在组成零件之前,能保持粘性和可下垂状态的时间。贮存期是指在 -12°C 或以下温度下、贮存在密封包装中的材料贮存时间。在此期间,材料能够保持它的操作寿命、机械寿命以及规定的所有其他要求。材料的使用期限必须同时满足这3个条件。图2给出了材料的使用期限与3个寿命的关系。

第①种情况是材料在低温库中贮存的时间太长了,以至于剩下的贮存寿命小于材料的操作寿命,那么该材料必须在贮存寿命到期前完成铺放、制袋工序并开始固化;第②种情况是材料在低温库中贮存的时间过长,以至于剩下的贮存寿命虽然大于材料的操作寿命但却小于材料的力学寿命,那么该材料首先应在操作寿命内完成铺放和制袋工序,但必须在贮存寿命到期前开始固化工序;第③种情况是最常见的情况,即材料必须在操作寿命前完成铺放和制袋工序,在力学寿命到期前开始固化工序。

(4) 操作规程及过程控制。通常情况,复合材料零部件的制造单位会依据该零件的图纸及相关的材料规范/标准、工艺规范来编制用于指导现场工人实际工作的操作规程,制造商应建立程序来确保操作规程对零件

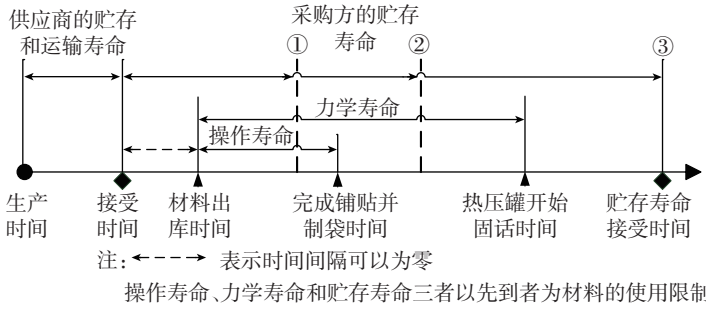


图2 材料操作寿命、力学寿命和贮存寿命的关系
Fig. 2 Relationship for operating life, mechanical life and storage life

的图纸及相关的材料规范 / 标准、工艺规范的符合性。

层压板的铺放方式可分为手工、自动铺放或两者结合 3 种方式,由于复杂零件结构将造成高的劳动强度,因此需要进行过程目视检测,以判断特定铺层的尺寸、方向、位置以及对接等是否满足工艺规范的要求,确保整个铺放过程中未对纤维造成损伤,未引入任何污染物和杂物。

固化工序对复合材料零件的性能影响非常大,因此需要严格的过程控制。图 3 是一个典型的纤维增强复合材料零件的固化曲线。从图中可以看到,整个固化过程需要严格的控制加热温度、施加压力、升降温速率、加温加压的时间点和时间段等参数。

通常,复合材料零件在使用前需要适当的机械加工,在评估加工工艺时需要考虑:专用切割和钻孔工具的高损耗率导致的加工缺陷、工具变钝引起缺陷、冷却液和产生的粉尘可能侵入零件造成的缺陷等,胶接装配步骤必须严格遵循规范和图纸。

对于复杂结构的零件需要采用胶接工艺,在进行胶接之前,必须控制预固化和未固化零件的表面状况、环境,以避免预结合水和沾污,必须进行严格的胶接工艺控制,目前没有可靠的无损检测程序能够检测“弱胶接”。

(5) 环境控制。水分、灰尘颗粒等污染物对复合材料零件的质量和性能的影响非常大,甚至是致命的,

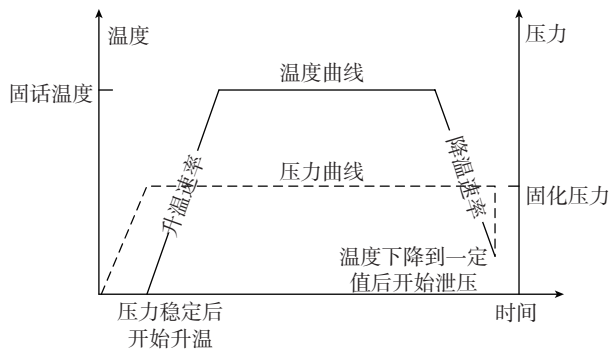


图3 典型的复合材料零件的固化曲线示意图
Fig. 3 Typical cure curves of typical composites parts

因此在复合材料零部件的制造过程中必须避免污染的威胁。如下料、铺放和胶接等工序的操作过程需要严格的环境条件(温度要求、湿度要求、洁净度要求等),对此现场应有合格的经过校验的设备进行检测,并保持完整的检测记录。此外,操作人员应按照操作规程采取穿戴工作服、帽子、手套等防护措施,并遵守洁净间的使用要求。

(6) 检测控制。无损检测(NDI)是一种常用的检验复合材料零部件内部质量的方法。但需要注意的是,无损检测只能检测出诸如零件厚度变化、芯子搭接、格子尺寸变化、金属嵌入物、气孔、脱粘等缺陷,除此之外,在层压板铺放过程中产生的大部分缺陷在完成零件的无损检测中是不能被发现的。无损检测作为一种特种工艺,也是需要过程检查的。首选无损检测的操作规程应得到客户的批准 / 认可,其次具有操作资格的操作人员、合格的对比试块、满足要求的检测环境和检测设备以及正确的扫描参数(如扫描灵敏度、扫描距离、扫描速度及参考点的设置)和完整的检验记录等,都是应当关注的重点。此外,最终的零件外形尺寸特性应当满足图纸的要求。

根据上述关注点,按照纤维增强复合材料的一般制造工艺过程,编制了一份检查单,并用于国内某型号民用运输类飞机的审查过程中,为判断纤维增强复合材料零部件的制造符合性提供了一个有效的辅助工具。

4 常见的缺陷

通常将纤维增强复合材料零部件的缺陷分为 3 类:结构缺陷、几何缺陷和装饰缺陷。

(1) 结构缺陷。结构缺陷是指能够直接危害复合材料结构承载能力的缺陷。许多不同类型的缺陷可以导致零部件局部刚度的改变、应力集中和强度的降低,如:纤维方向偏差、褶皱、热损伤、污染的胶接(弱胶接)、分层、气孔、局部纤维和树脂的体积分数变异(贫胶)和冲击损伤等。要特别注意在钻孔、切割等机械加工过程中所可能产生的缺陷,如分层、毛刺、劈裂、表面纤维撕裂等。

(2) 几何缺陷。几何缺陷是指复合材料零件丧失尺寸稳定性或超出公差范围的缺陷。通常与结构缺陷并存,一般由工装、材料、铺放或固化问题导致,造成零件的几何特征超出公差要求,如:板翘曲、厚度偏离、超出局部公差,以及其他影响刚度、稳定性和强度的缺陷。

(3) 装饰缺陷。装饰缺陷是指影响零部件外观但不妨碍复合材料零部件的承载能力的缺陷。通常限于

(下转第 72 页)

轮、从动轮共同振型,如图4(e)~(g)所示的弯曲振型。到第20阶,振型只有主动轮的圆周振,如图4(h)所示。

分析从动轮固有频率比主动轮低,共振时变形量相对较大。结构共振时,最有可能发生的是弯曲振型。在齿轮系统结构设计时,应充分考虑齿轮副的固有频率和振型,使工作频率避开其固有频率,防止结构产生破坏^[7]。

3.2 齿轮副瞬态响应分析

将齿轮副模态分析的模型数据文件读入,定义载荷工况、设定边界条件并提交分析。载荷为沿轴向大小为10N的冲击载荷。分别选取主、从动轮的啮合点、轮齿上的点及内轴上的点进行瞬态响应分析,结果如图5所示。

由频响分析结果可知,所选取各点均在很短的时间内产生振动,最大冲击变形出现在最开始阶段。当振动停止后,有残余塑性变形。但变形值都非常小,可以忽略不计,结构并未产生破坏^[8]。

4 结论

本文采用有限元分析方法研究了圆柱直齿轮传动的动态特性。考虑齿轮啮合时接触条件对整个结构动态特性的影响,建立起有限元模型,进行了模态和瞬态响应分析。得到以下结论:(1)通过对比模态分析得到的各阶频率和振型可知,低阶振型以从动轮为主,高阶振型主、从动轮均有明显振动;从动轮固有频率明显低于主动轮。(2)通过瞬态响应分析结果可知,以工作状态下的轴向冲击载荷进行仿真,结构产生微小塑性变形,但没有破坏的危险。(3)仿真结果对了解圆柱齿轮副的固有动态特性以及进一步的结构优化设计具有重要意义。

参考文献

[1] 杨超云,万茂林,诸葛晓宇.差速器锥齿轮参数化建模及模态分析.轻型汽车技术,2012(1):18-20.
 [2] 吴斌,葛文杰.具有不同腹板孔的弧齿锥齿轮模态分析.机械制造,2011(6):49-50.
 [3] 王犇,华林.高速旋转状态下汽车弧齿锥齿轮的动力学分析.汽车工程,2011(5):447-451.
 [4] 陶泽光,李润芳.齿轮系统有限元模态分析.机械设计与研究,2000(3):45-46.
 [5] 韩清凯,孙伟.弹性力学及有限元法基础教程.济南:山东大学出版社,2009:68-102.
 [6] 马爱军.PATRAN和NASTRAN有限元分析专业教程.北京:清华大学出版社,2005:33-98.
 [7] 薛延华,王志广,江新,庄焕平.某型艇用双联斜齿轮本体振动模态分析.机械传动,2011(5):46-48.
 [8] 庞辉,方宗德,欧卫林.多平行齿轮耦合转子系统的振动特性分析.振动与冲击,2007(6):21-25.

(责编 亿霖)

(上接第68页)

零件外表面和边缘,如:表面抛光差、可接受的小沟槽或污点等。

适航审查主要关注前两类的缺陷。大部分危险的缺陷必须被排除(或至少限制在局部,例如出现在小的面积上)。避免上述缺陷的主要方法是:采用规范的质量控制来确保原材料的质量,严密的生产工艺过程控制,不断地总结制造过程中发现的问题并予以解决,积累经验 and 数据。

5 结束语

当今复合材料零部件的制造工艺在不断的发展,各种低成本制造技术应运而生,纤维缝合技术、树脂转移模塑成形技术(RTM)、树脂膜渗透成形技术(RFI)、低成本模具技术、低温低压固化技术、电子束固化技术、缠绕技术、铺放技术等得到迅速发展和应用。适航需要关注新技术、新工艺,不断完善有关规章、程序的要求,掌握相关审查技术,为民用航空事业的发展,做好充分的准备。

我国将成为先进复合材料的最大用户,却面临着国外技术的严密封锁与技术储备的严重不足。为实现先进复合材料及其成形制造技术在民用航空乃至国防、航空航天领域的广泛应用,必须坚持自主研发,解决原料问题,相关理论与方法问题,规范和标准制定问题,政策支持问题。尤其是应特别关注复合材料零部件设计和制造过程的标准化、规范化,在借鉴国外先进经验的基础上,形成共享的标准化的行业材料规范和工艺规范,以利于民用航空工业的发展。

参考文献

[1] 李宏运.复合材料在民机应用中有关适航问题的探讨.航空制造技术,2009(16):26-29.
 [2] 杨乃宾,梁伟.大型民机机体结构用复合材料分析.航空制造技术,2009(5):68-70.
 [3] 张纪奎,郇正能,程小全,等.复合材料整体结构在大型民机上的应用.航空制造技术,2007(9):38-43.
 [4] 中国民用航空总局.中华人民共和国民用航空器适航管理条例,1987.
 [5] 中国民用航空总局.民用航空产品和零部件合格审定规定,CCAR-21-R3,2007.
 [6] 中国民用航空局航空器适航审定司.航空器型号合格审定程序,AP-21-AA-2011-03-R4,2011.
 [7] 中国民用航空局航空器适航审定司.生产批准和监督程序,AP-21-AA-2010-04-R4,2011.
 [8] 中国民用航空局.运输类飞机适航标准,CCAR-25-R4,2011.
 [9] Federal Aviation Administration. Quality control for the manufacture of composite structures, AC 21-26, 1989.

(责编 小城)