

复合材料在飞机主承力结构上的应用及无损检测标准

Application of Composites in Aircraft Main Load-Bearing Structure and Standard of NDI

中航通飞华南飞机工业有限公司 施晓春 冯浩
中航通飞研究院有限公司 罗琳胤 曾小苗

[摘要] 综述了国内外飞机复合材料主承力结构、机身应用现状及航空制件质量验收标准应用概况,阐述了航空复合材料零件验收标准的制定依据和原则,以及航空复合材料无损检测验收标准的主要内容;对比并分析了国际主要航空企业的无损检测验收标准,简述了飞机复合材料主承力结构及机身无损检测标准的发展趋势。

关键词: 无损检测 验收标准 损伤容限

[ABSTRACT] The application of aircraft composites in the main load-bearing structure and fuselage, the aviation parts quality acceptance standard of NDI are introduced. The basis and principles of the aviation composites acceptance standards are described. The detail of the aircraft composites NDI acceptance standard is introduced. The differences of the international aviation company's NDI acceptance standard are compared and analyzed, meanwhile the future development of the main load-bearing composites structure and NDI standard for fuselage are described.

Keywords: NDI Acceptance standard Damage tolerance

一代材料,一代工艺,一代检测。在科技迅猛发展的今天,复合材料已广泛应用于越来越多的领域,尤其是航空航天领域,继铝、钢、钛之后迅速成为最重要的结构材料。同时,复合材料主承力结构的检测及相应的各类检测标准也脱颖而出,成为当前先进复合材料产业的重要支撑。

1 国内外飞机复合材料主承力结构及机身应用概况

现代科学技术的发展牵引着工程材料正向复合化、高性能化、功能化、结构-功能一体化和智能化发展,而先进复合材料的发展就是其中的典型代表之一。自1967年问世以来,复合材料因具有高比强度和比模量、

各向异性和可设计性、良好的抗疲劳特性、易于大面积成型及可被赋予新功能等特点,被广泛应用于工业界、体育用品界,尤其是在对重量、性能有苛刻要求的航空航天领域中受到特别的关注与重视,并为飞行器性能改进作出了重要贡献,成为航空航天4大材料之一。

1.1 国外技术产品发展状况、水平和趋势

在国外,通用飞机复合材料机体结构整体化设计和制造技术已有近50年的历程。奥地利Diamond飞机公司,美国Cirrus、Liberty和Cessna飞机公司是目前世界上复合材料通用飞机生产规模和销量最大的制造商。新研发的飞机机型已达数10种,机体结构复合材料的使用率已超过了85%。除此之外,Epic、Embraer、Honda、Spectrum Aeronautical、Farnborough Aircraft、Bombardier和Grob Aerospace等数百家飞机公司和私人制造者目前正在进行复合材料飞机结构的试验验证和技术探索。美国Raytheon公司甚至率先在喷气公务机上全面采用先进的碳纤维复合材料结构,并完成适航取证工作,正式投放市场。

大型民用客机方面,美国波音公司在787飞机机翼、机身、水平尾翼和垂直尾翼、内装饰和舱门等部件上大量使用了先进复合材料结构设计和制造工艺技术,复合材料的用量占到了整个飞机重量的50%,该型飞机已交付用户投入使用。空客公司也不甘落后,在其新研制的A350WB飞机机翼、机身、腹部整流罩、水平尾翼和垂直尾翼等结构上大量使用先进复合材料,其用量占到了整个飞机重量的53%^[1](见图1)。

1.2 国内技术产品发展状况、水平和趋势

我国民机复合材料结构应用技术研究起步较晚,即使将正在取证的民用飞机包括在内,复合材料结构使用比例也很有限。例如,已经取证的小鹰500仅在发动机罩、尾椎和座舱侧蒙皮等部位使用了玻璃纤维复合材料;正在取证的支线客机ARJ21的方向舵、襟翼和副翼等次要结构和雷达罩采用了先进复合材料,通用飞机Y12F的副翼、升降舵和方向舵也采用了复合材料。



图1 先进复合材料在航空航天领域的应用

Fig.1 Application of advanced composites in aerospace industry

国内飞机制造商希望在在研型号合格审定过程中通过FAA的“影子审查”,积累一定的复合材料验证技术和适航审定经验。目前,国内已有航空企业正在研制主承力结构及机身采用全复合材料飞机,并获初步成功。表1为国内外民用飞机复合材料机体结构的应用情况。

2 国内外飞机复合材料主承力结构及机身质量验收标准应用概况

随着复合材料在航空航天领域的广泛应用,无损检

表1 国内外部分飞机复合材料机体结构应用情况

型号	制造商	复合材料应用部位	复合材料类型
DA20-C1	钻石公司 (Diamond)	机身、垂尾、襟翼、副翼	玻璃纤维复合材料
		机翼翼梁	玻璃 / 碳纤维混杂复合材料
		机翼、方向舵、平尾蒙皮	玻璃纤维和聚氯乙烯泡沫夹层结构
Lear-85	庞巴迪 (Bombardier)	机身、机翼、尾翼	碳 / 环氧预浸料复合材料
飞鸿系列	巴西航空 (Embraer)	机身、尾翼	碳 / 环氧预浸料复合材料
Cessna400	赛斯纳公司 (Cessna)	翼梁、机身梁、水平安定面、操纵面等主承力构件	碳 / 环氧预浸料复合材料
		其他大部分结构	E 玻璃 / 环氧预浸料复合材料
SR2X	西锐公司 (Cirrus)	机翼、机身、尾翼结构件	E 玻璃 / 环氧预浸料复合材料
Epic VLJ	日蚀公司 (Epic)	机身、机翼、尾翼结构件	碳 / 环氧预浸料复合材料
Hawker4000	比奇公司 (Beech)	机身结构	碳 / 环氧和芳纶 / 酚醛纸蜂窝的夹层结构
787	波音公司 (Boeing)	机翼、机身、尾翼等	碳 / 环氧预浸料复合材料
A350XWB	空客公司 (Airbus)	机翼、机身、尾翼等	碳 / 环氧预浸料复合材料
小鹰 500	国内	发动机罩、尾椎和座舱侧蒙皮	玻璃纤维复合材料
通用飞机 Y12F	国内	副翼、升降舵和方向舵	复合材料

测成为首选的检测技术,另外还有目视检测及配合无损检测的其他检测方法。国内复合材料超声检测标准常依照《GJB1038.1A 纤维增强复合材料无损检测方法》(针对层压板)、《HB7224-95 复合材料构件通用技术条件》、《HB5460-90 蜂窝构件超声波穿透 C 扫描检测方法》、《HB5461-90 金属蜂窝胶接结构缺陷类型及试块》,射线检测标准有《GJB1038.2A 纤维增强复合材料无损检测方法》第二部分。

国外复合材料检测标准公开发表的有《ASTME2580-07 Standard Practice for Ultrasonic Testing of Flat Panel Composites and Sandwich Core Materials used in Aerospace Applications》^[2]。该标准主要针对平面型层压板和夹层结构复合材料制件检测,可用于材料制造全过程,如生产阶段的质量控制与优化、产品检验、在役检测等,并在探头、设备、试块选用方法及灵敏度调整和缺陷评定方面均有规定。随着我国的改革开放,国内航空企业已和国外企业合作进行多种型号的飞机生产,引进了欧美主要厂商的生产技术和检测标准,空客、波音、庞巴迪等公司的无损检测标准已在国内航空各大主机厂应用。这从检测设备、检测方法、检测标准等各方面促进了我国无损检测技术的发展。

3 复合材料零件验收标准的制定依据和原则

国外复合材料验收标准的制定原则是:复合材料零件验收必须以可以接收的破坏性试验事实为依据,验收标准按照每一零件所能承受的疲劳载荷、零件损伤容限和使用寿命以及试件全比例试验获得的数据分析制定。也就是说,每一部件的验收要求由其承受力决定,通常分主承受力件、次承受力件、一般件,或分为关键件、重要件、一般件(有的标准分高应力区、中应力区、低应力区)。具体的分类方法和流程可参考图2。

规则1: 潜伏故障模式至少应与一个专门部件或接口部件的其他故障模式联系在一起进行分析。后者故障的选择应能代表与潜伏故障最坏的后果相组合的状况。

规则2: 损伤容限余度的确定。

规则3: 具有损伤验证的情况。

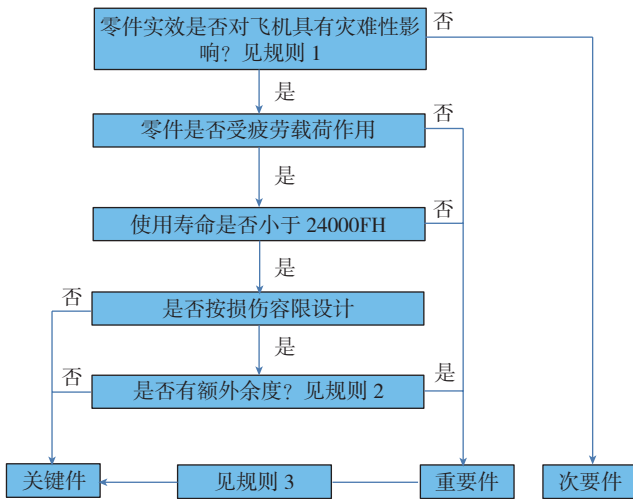


图2 航空零件按承载力分类方法
Fig.2 Aviation part classification method according to force bearing size

以上所述的仅是一般原则,由于各型号飞机承受力相差很大,根据强度计算、零件损伤容限及使用寿命以及试件全比例试验获得的数据分析差别很大,如有的飞机无损检测标准分5种质量等级,甚至9个质量等级;另外,同一零件的不同部位还分为多种质量等级,如西锐公司对复合材料分层、夹杂、树脂不足类缺陷制定了9个质量等级,同一翼梁的缘条、腹板、圆角3个不同部位分3个质量等级(因为飞机运行时这3个部位受力状况不同)。

4 复合材料零件验收标准的主要内容

首先,针对复合材料零件结构划分检测区域,按承受的疲劳载荷、零件损伤容限及使用寿命,确定零件验收等级;根据缺陷性质及类型的不同,确定相应验收标准。

4.1 目视检测验收标准

目视检测是防备与飞机安全有关破坏的第一道防线,是早期检测飞机结构最为简单有效,而且至今仍然在使用的一种无损检测方法。FAA 咨询通告 AC 43-204 中对“目视检测”的定义是:单独用眼睛或与各种辅助工具联合使用作为感觉手段来判断被检测单元状态的方法。一般目视检测用于对复合材料结构件较大范围的内部或外部区域进行目视检测,有时需要适当的光照和简单的辅助检测工具(如镜子),以发现较大的制造缺陷或结构异常;详细目视检测用于对局部区域的内部或外部进行近距离的仔细目视检测,需要适当的光照和复杂的辅助工具(如透镜、内窥镜),以发现较小的制造缺陷或结构异常。外部缺陷主要有树脂皱折、树脂过多、表面麻坑、机械损伤(包括钻孔分层)、碰撞损伤、打磨过度等。国内目视检测验收标准描述目

前很不规范、精确,往往需要凭借检验人员的工作经验。值得注意的是,国外公司对目视检测编制了专门的检测规程,研制出专门的对比试块或对比照片作为验收标准。

目视检测只能检查结构的外部缺陷或通过外部缺陷推测判断一些内部缺陷,为以后的内部缺陷无损检测提供有价值的信息。

4.2 层压板常见缺陷验收要求

针对层压板分层、夹杂、树脂不足类缺陷的验收,有如下主要方面:

- (1) 单个缺陷允许面积、大小;
- (2) 多个缺陷允许面积、大小;
- (3) 缺陷之间距离限制。

验收评价通常按如下流程(见图3)。

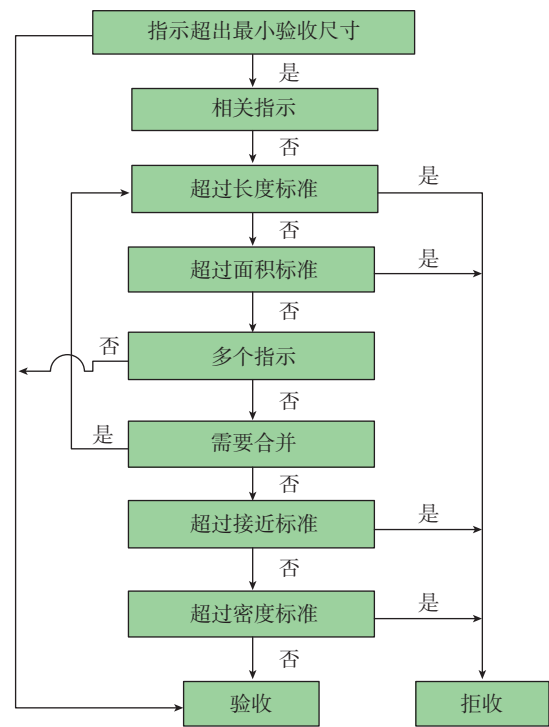


图3 验收/拒收工艺循环
Fig.3 Acceptance/rejection process circulation

4.3 胶接结构常见缺陷验收要求

复合材料蜂窝/泡沫夹层结构、二次胶接结构脱粘缺陷验收标准按照不同零件不同部位所受实际载荷的不同,将被检零件进行分区验收。

以下为国外某飞机制造公司的验收标准:

- (1) A区: 允许缺陷面积不得大于 30 mm²,最大尺寸不得大于 6 mm,合计不超过 2 处,相邻缺陷区域边缘最小距离不得小于 260 mm;
- (2) B区: 允许缺陷尺寸不得大于 50mm²,最大尺寸不得大于 9mm,相邻缺陷区域边缘最小距离不得小于

180mm;

(3) C区: 允许缺陷尺寸不得大于 100mm^2 , 最大尺寸不得大于 12mm, 相邻缺陷区域边缘最小距离不得小于 100mm。

除脱胶缺陷控制外, 还对蜂窝缺陷、镶嵌件灌封不足、架桥、外来夹杂物等缺陷分别作出规定。

4.4 检测对比试块

无损检测对比试块是检测标准的核心硬件, 模拟复合材料各类自然缺陷对检测仪器的传感或数字、图像反映、人工特制能代表其反应特征当量的对比试块。标块内有按验收标准要求制定的、各种大小缺陷当量的人工缺陷。当检测复合材料制件发现缺陷时, 可用同种材料、同样工艺制作、同样缺陷埋深对比试块中的当量缺陷比较, 判断缺陷容限是否超标, 确定验收或拒收。

目前普遍使用的有二层聚四氟乙烯薄膜(或其他不透声材料)重合迭放、模拟分层缺陷的对比试块, 见图4。图5为聚四氟乙烯薄膜人工缺陷C扫描图像。模拟胶接构件脱胶的对比试块, 有系列埋藏深度、不同当量直径的平底孔试块, 从被检件截取粘贴人工缺陷的对比试块, 还有带表面自然伤的实物对比试块或照片对比试样等。

4.5 复合材料孔隙率验收要求

复合材料层压板结构孔隙率验收标准同样依据被

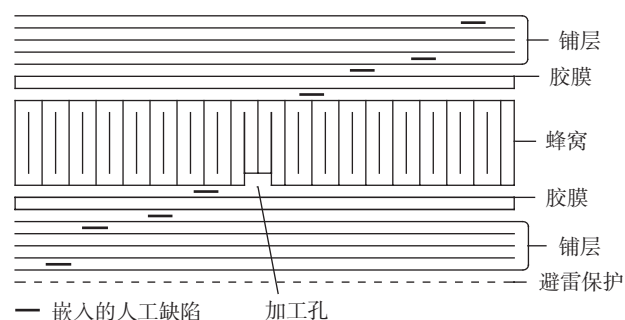


图4 典型的对比试块嵌入人工缺陷示意图

Fig.4 Diagram of typical reference blocks embedded artificial defects

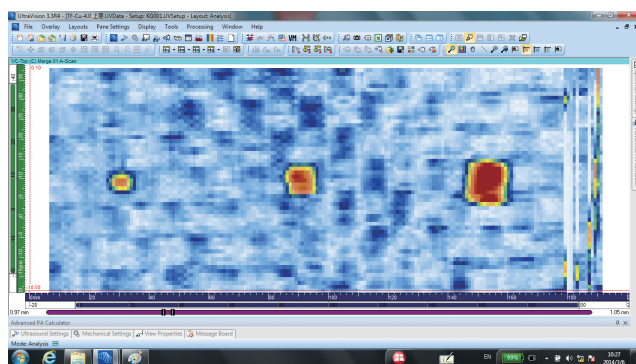


图5 聚四氟乙烯薄膜人工缺陷C扫描图像

Fig.5 C-scan image of artificial defects in teflon fiber

检零件所承载荷的不同来制定相应质量等级的孔隙率接收范围。利用金相显微镜法(面孔隙率)、溶解法(体孔隙率)测量层压板孔隙含量, 确定被检试块孔隙含量与超声检测底波衰减值的对应关系, 最终形成层压板孔隙率质量验收要求。表2为国外某飞机制造公司层压板孔隙率质量验收标准。

表2 层压板孔隙率质量验收要求

质量等级	体积孔隙率含量/%	相对同材料、同厚度、零缺陷对比试块, 超声波底波衰减分贝 / dB	相对同材料、同厚度、零缺陷对比试块, 超声波底波衰减幅度(9.5mm 探头)
A	< 1	6	2.5MHz 频率探头, 衰减 25%
B	< 1.5	12	5MHz 频率探头, 衰减 50%
C	< 2	18	10MHz 频率探头, 衰减 75%

目前应用较普遍的是用超声波检测孔隙率, 其具体实施标准是运用相应的孔隙率对比试块。用于无损检测评定的孔隙率对比试块应该通过体积和性能验证。在能够提供有效的无损检测的分析方法下, 这些试块应该提供一个与标准一致的孔隙分布。无损检测应该进行衰减图表测绘, 建立变厚层压的孔隙率。铺层厚度应该超过真实检测厚度的 10% 或 2 层, 以大约 1% 为间隙, 从最小到最大铺层厚度以及从 1% 到可测的最大值建立孔隙率衰减曲线。在适用的 UT 规程或技术单下, 分贝值变化图表应该由企业指定的 III 级人员建立和审核, 并为孔隙率测定评估分析工具。分贝值变化图可用于自动化系统分析软件的开发。在孔隙率体积百分比测量中, 标准对比试块的制造要与各种孔隙率水平的生产零件相似, 并通过衰减状况确定孔隙率水平。在孔隙率对比试块中确切的孔隙率水平应该由其他方法来验证(如目视、酸蚀、显微 CT 等方法)。

表3为国际航空企业复合材料制件(层压板结构)验收标准应用概况, 各企业标准一致将验收质量按照被检零件的实际受力情况划分为不同等级, 对复合材料空隙含量分区要求, 对多个缺陷的尺寸、缺陷间距都有相应验收依据和要求, 并参考被检零件的不同检测指标综合评定质量等级。

5 飞机复合材料主承力结构及机身无损检测标准的发展趋势

先进材料、先进工艺的应用, 必将促进先进检测方

(下转第 124 页)

除入侵记录,那么通过审查系统日志文件就可以了解入侵过程,从而进行修护和下一步的防护。

(4) 建立紧急情况应对策略。

基于网络控制的大客生产线,由于不确定因素而导致的系统问题随时都有可能发生,为了保证经济、声誉、人员损失最小化,制定相应的紧急情况应对策略是非常有必要的。该响应策略需要在业务中断、系统宕机、网络瘫痪等事件触发后快速有效地恢复系统运行,而由于突发事件的不确定性和多样性,应急策略往往需要在弹性和通用性之间寻求平衡点^[7]。针对特定的信息安全事件制定相应的通用的应对策略,如在日常维护级别中,可以通过数据冗余来达到存储介质损坏而不丢失数据的目的,设置备用的控制服务器来确保生产线不会停滞太久等^[8]。

4 结束语

民机生产系统是现代化工控系统,虽有别于普通 IT 系统,但其信息安全的防范措施与传统网络安全存在较多的共性。本文结合民机生产系统网络结构和安全需求,针对其潜在的威胁,包括人员安全意识、软件漏洞、设备局限性等,提出了相应的安全策略。但是由于安全防范存在的滞后性,所以并不存在能够防范所有安全威胁的策略,企业的信息安全仍需其中的安全部门进一步维护。值得强调的是,建立安全策略与流程是其中很重要的一个环节,用“三分技术,七分管理”来形容工业控制系统信息安全不无道理,所以在企业创建初期设立合理的管理策略是非常有必要的。

参考文献

[1] 张克伟,曹兴强,刘贵阳.烟草工业控制系统安全防护分析与对策.电子测试,2014(2):144-145.
 [2] 岳妍瑛,王彬.油田工业控制系统信息安全浅析.自动化博览,2013(3):38-42.
 [3] 潘明惠,偏瑞琪,李志民.电力系统信息安全应用研究.中国电力,2001(5):46-49.
 [4] 欧阳劲松,丁露.IEC62443工控网络与系统信息安全标准综述.信息技术与标准化,2012(3):24-27.
 [5] 唐文.工业自动化控制系统信息安全研究.计算机安全,2012(4):2-7.
 [6] 仇伟.现代化制造企业信息安全及其应对策略.科技创业家,2012(12):128-130.
 [7] Holečko P, Krbilová I. IT security aspects of industrial control systems. Advances in Electrical and Electronic Engineering, 2006(5):1336-1376.
 [8] Stouffer K, Falco J, Scarfone K. SP800-82 "Guide to industrial control systems (ICS) security". Gaithersburg: NIST Special Publication, 2011: 55-62.

(责编 深蓝)

(上接第 119 页)

表3 航空企业复合材料制件验收标准应用概况(以层压板制件为例)

公司	质量等级(分区域)	孔隙率要求	检测起始灵敏度当量缺陷/mm	多个缺陷缺陷尺寸	缺陷间距离限制/mm
SR	φ 6~40mm 9个等级	5MHz/9.5mm 探头,超声底波衰减不超过75%	6.3	6.3~38mm	87~100
BE	A区,关键结构; B区,梁/肋/框; C区,非承力区	A区 1.0%; B区 1.5%; C区 2.0%	6	A区 < 9mm; B区 < 12mm; C区 < 15mm	A区 > 180; B区 > 100; C区 > 100
GN	一级: φ 6mm; 二级: φ 10mm; 三级: φ 12mm	5MHz/9.5mm 探头,超声底波衰减不超过75%	6	500mm内累计面积: 一级:10%; 二级:15%; 三级:25%	100
AZ	关键重要一般	高应力区 < 5%; 中应力区 < 8%; 低应力区查制件表面	5	零件各异 φ 9~30mm	按零件特定间距为100~300

法和标准的发展。随着飞机复合材料用量的增大,尤其是在翼梁、机身、直升机旋翼、机翼、方向舵等承力结构上的应用,促进了检测标准的进一步精细化,使主承力构件检测要求更加严格,质量分等级、检测区域更加具有针对性。大飞机研制与生产几乎对每一制件都有单独的验收要求。纵观其发展趋势,呈现出如下特点:一是特定的专用型,二是可广泛适用的通用型。有的型号飞机主承力结构处于应力区,其损伤容限与其他型号飞机差别明显,要求严格,尤其在研制早期,对各制件要求针对性强。另外,对主要部件均有特定标准,需在图纸上一一标明,检测程序 and 操作方法也要具体。普通的标准适用范围小,而通用型标准可用于生产阶段的质量控制、优化产品检验,也可用于在役检测。另外,通用型标准对质量分级、检测分区、单个/多个缺陷、缺陷间距限制等都有规范性描述,使用者可“对号入座”,即按照被检件损伤容限和使用寿命,选择标准中对应的质量控制等级和检测评定方法。

参考文献

[1] 张丽华,范玉青.复合材料在飞机上应用评述.航空制造技术,2006(3): 64-66.
 [2] 包建文.高效低成本复合材料及其制造技术.北京:国防工业出版社,2012.

(责编 谷雨)