

研究论文

基于全生命周期的航空碳纤维增强树脂基复合材料构件制造标准体系构建研究

樊洁, 王俊涛, 闫敏, 张鹭, 冯冰

摘要 复合材料构件制造具有多环节、多要素、过程敏感等特点, 面对中国碳纤维增强树脂基复合材料构件在质量稳定性和成本上的差距, 为推动复合材料先进技术的发展和应用, 行业亟需建立一套覆盖复合材料构件研制管理及制造全生命周期的规范体系。研究了以航空碳纤维增强树脂基复合材料为代表的先进复合材料构件的全生命周期活动和研制特点, 总结了国内外相关标准现状, 深刻分析国内标准存在问题: 相比国外航空发达国家通过行业级、企业级标准和数据库等覆盖碳纤维增强树脂基复合材料的全生命周期, 中国已具备一定的标准基础, 但仍面临标准不成体系、部分标准缺失、更新不及时等问题, 不能适应先进技术发展需要。结合碳纤维增强树脂基复合材料制造的全生命周期, 围绕航空复合材料构件的产品实现, 构建起“设计-制造-试验检测-过程控制与认证-应用维修”闭环的行业级标准体系框架, 为中国碳纤维增强树脂基复合材料的技术发展和应用推广提供有力支持。

关键词 碳纤维增强树脂基复合材料; 构件制造; 全生命周期; 研制管理; 标准体系

碳纤维增强树脂基复合材料相比航空用铝合金、钛合金等传统金属材料, 具有轻质高强、抗疲劳、耐腐蚀、可设计性强的显著优势, 已在航空器承力构件中大量应用, 并逐步替代金属材料, 以满足日益苛刻的减重需求^[1]。从国外来看, 碳纤维增强树脂基复合材料在航空器中的应用已非常成熟, 呈现出性能优化、含量提高、应用部位从次承力部件向主承力部件转变的发展趋势^[2-3]。国内“十五”规划以来加大了相关投资, 碳纤维增强树脂基复合材料的设计、制造等关键技术取得重要进展^[1]。目前国产 T300、T700 级碳纤维增强树脂基复合材料构件已应用于军民机, T800 级碳纤维增强树脂基复合材料已完成军机装机验证, 在提高飞机结构效率、减重节能方面呈现巨大潜力。

中国航空综合技术研究所, 北京 100028

高性能碳纤维增强树脂基复合材料构件的高质量、高效率 and 低成本制造, 以及其在航空等领域的成熟应用, 对于国家而言具有重要的战略意义^[4]。近几十年来, 国内支撑复合材料典型构件的设计、制造、试验、检测等技术发展迅速, 并呈现出一体化、数字化、高精度的发展趋势^[5]。然而, 目前中国碳纤维增强树脂基复合材料构件在制造质量稳定性和成本上, 与航空发达国家仍存在一定差距^[6], 尚不能完全满足在航空器上高含量、大批量应用的迫切需求。

究其根源, 主要在于行业内缺乏针对复合材料构件研制管理且覆盖其制造全生命周期的规范, 导致人为因素成为制约产品质量的关键, 产品的制造质量、周期、成本可控性差^[7]。复合材料构件制造是一个多环节、多要素的复杂过程, 且具有显著的过程敏感性, 构件的性能与其结构的设计、所用的材料、采取的工

收稿日期: 2025-12-01; 修回日期: 2026-01-27

作者简介: 樊洁, 博士研究生, 研究方向为复合材料技术与标准化, 电子信箱: jfan0701@163.com

引用格式: 樊洁, 王俊涛, 闫敏, 等. 基于全生命周期的航空碳纤维增强树脂基复合材料构件制造标准体系构建研究[J]. 科技导报, 2026, 44(7): 103-114;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.12.00008

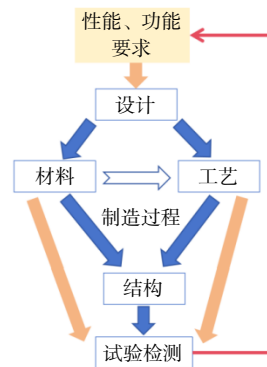
艺、制备过程的控制和试验方法等息息相关,各个要素之间关系复杂、多向联动。复合材料构件的制造应进行全流程把控,一体化统筹设计、材料、工艺、试验与检测、维修、过程控制与认证等各方面的需求。现有标准多关注少数重要环节,尚未建立覆盖设计、制造、检测、过程控制与认证到应用维修的闭环标准体系。

因此,本文深入研究了以航空碳纤维增强树脂基复合材料为代表的先进复合材料构件制造的全生命周期活动,分析了其研制特点,通过对国内外相关标准现状的梳理总结,深刻阐明了国内现行标准存在的问题。进一步结合复合材料构件制造的全生命周期,围绕航空复合材料构件产品实现全流程,以碳纤维增强树脂基复合材料构件制造的技术架构为底层逻辑,提出行业层面的标准体系框架,为中国碳纤维增强树脂基复合材料的技术发展和应用推广提供支撑。

1 基于全生命周期的复合材料构件制造

以碳纤维增强树脂基复合材料为代表的先进复合材料构件制造是一个多环节、多要素的复杂过程,且具有显著的过程敏感性,所制构件的性能与其结构设计、所用材料、采取的工艺、制造过程的控制、所采取的试验方法等息息相关,且各要素之间关系复杂、多向联动,绝不可单独割裂。如图1所示,构件的结构设计决定了主要的材料类型,结构设计和材料的工艺性共同决定了工艺类型,制造过程的控制和所采取的试验方法决定了其性能数据,性能数据对设计性能的满足程度决定了结构验证是否形成闭环。各要素的变化对复合材料结构的影响都需慎重评估,关键要素的变化会对其造成致命影响。尤其对于强调原材料、工艺制造、设计值、试验验证等各方面完整性的民机复合材料结构适航验证而言^[8],这一特点会更为突出。一个典型的案例是,某项目由于碳纤维的关键生产参数发生重大变化,造成材料性能的本质性改变,导致近10年的相关验证工作归零,由此造成的人力、时间和经济损失难以估量。因此,为实现复合材料构件的高效率、低成本制造目标,应从复合材料结构制造的全生命周期活动出发,一体化地考虑设计、材料、工艺、试验与检测、维修、过程控制与认证等各方面的技术需求,而不应割裂地去看。1.1和1.2节将

分别从航空碳纤维增强树脂基复合材料构件制造的全生命周期活动和研制特点展开研讨。



1.1 复合材料构件制造全生命周期活动

经调研分析,典型航空碳纤维增强树脂基复合材料构件制造的全生命周期活动如图2所示。本文参考航空装备的研制生产与服务保障全周期活动,将其分为材料研制、构件研制、批量生产和应用维修4个主要阶段。材料研制结果作为复合材料构件研制的输入,通过提供基本的材料性能数据,为设计时的材料筛选提供依据;同时,为更好地满足型号需求,构件研制过程中也会根据实际需要对材料提出改进或新研需求。构件研制是复合材料构件制造的核心环节,整体包括概念设计、初步设计、详细设计、试制与验证等阶段^[9],每一阶段在设计、制造、试验、检测等方面开展相应工作,且工作侧重点有所差别。批产阶段,主要按照定型的设计图纸和工艺规范进行制造,并通过适当的过程控制手段保障所生产的复合材料构件的质量符合性和批次稳定性。构件装机之后即进入复合材料构件的应用维修阶段。在该阶段,通过结构健康监测发现构件服役过程中产生的缺陷、损伤等问题,并根据设计周期和实际需要开展维修。当发生质量事故时,按照规范流程进行失效分析^[10],其结果可为复合材料构件制造的材料选型、结构设计、工艺优化等环节提供建议^[11],从而形成典型航空碳纤维增强树脂基复合材料构件制造的全生命周期活动的闭环。

1.2 复合材料构件研制特点

在复合材料构件制造过程中,构件研制是非常重要的部分。先进复合材料构件研制的整体流程既要与型号研制的整体流程协调一致,又要保持自己的特色。其独特性在于制造方式由复合材料自身的技术特点

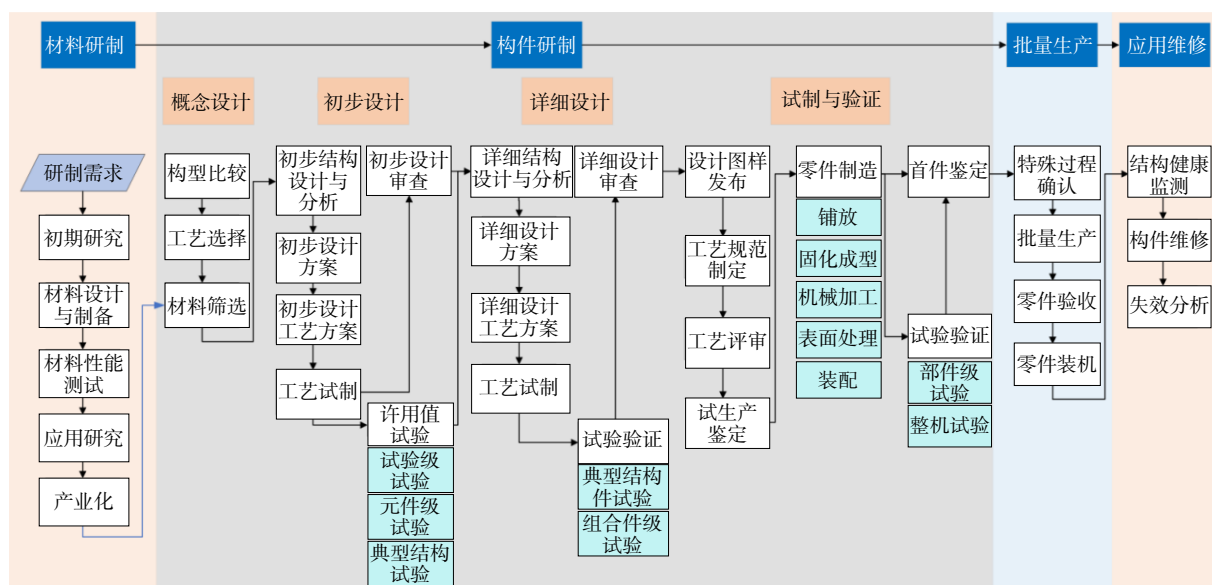


图2 典型航空碳纤维增强树脂基复合材料构件制造全生命周期活动

所决定,与传统金属材料制造完全不同。

不同于金属材料,复合材料通常在完成材料制备的过程中实现结构成型,二者不可分割。制造过程中产生的缺陷对结构性能的影响、结构实际的失效模式与设计的相符性,直接决定设计预想的结构、性能目标能否通过相应工艺实现。这是复合材料构件研制过程中要解决的核心问题,也是最耗费时间、成本的环节。这就决定了复合材料构件研制的复杂度高、技术交叉面广、迭代需求大,因此要求在复合材料构件研制过程中结构设计与成型工艺必须紧密地协调配合^[12]。

目前各单位在复合材料构件研制中基本参考《民用飞机研制程序》(HB 8525—2017)的做法,研制流程如图3所示。在传统的G5节点需完成结构供应商和

制造方法的冻结,G6节点基本冻结主结构的材料值和设计值,在G7节点详细设计发图后就不得再发生材料、铺层、工艺参数等对结构性能有影响的变更,否则后续的制造、审查相关工作就得推倒重来。这一节点管控模式对于金属材料结构研制是适用的,而针对复合材料构件研制则存在以下2方面问题:一方面,针对详细设计阶段前的材料值和设计值初始值,国内主要采用教科书推荐或经验给出的许用值,在保证安全的前提下,往往会牺牲设计的先进性;另一方面,G7节点之前设计和工艺如果配合不好,易在G7节点后发生变更,进而造成后续制造和验证工作返工,导致研制效率低下。

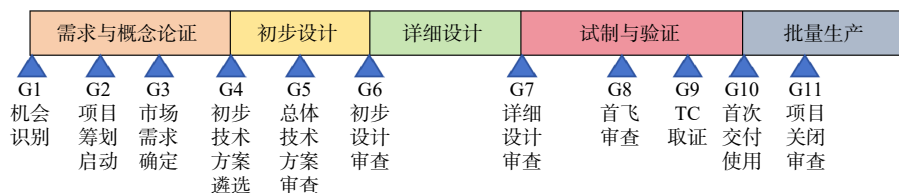


图3 民机研制程序(数据来源于《民用飞机研制程序》(HB 8525—2017))

为了解决这一关键难题,波音等国外主要制造商在复合材料构件研制过程中,构建了试生产制造、试生产验证、首件鉴定3大核心环节,在初步设计阶段即开展结构原型件的制造,以其试验数据作为初始设计的许用值,同时解决制造工艺与设计的协调配合问题。在组织方式上考虑组建集成产品开发团队,使制

造商提前介入设计过程,极大提高研制效率。中国商用飞机有限责任公司(简称中国商飞)^[9]、昌河飞机工业有限责任公司(简称昌飞)^[13]、中航西安飞机工业集团股份有限公司(简称西飞)^[7]等国内制造单位借鉴这套先进模式,优化复合材料构件研制流程,在设计早期阶段通过设计与制造紧密迭代验证,打通了设计制

造一体化的路径,显著缩短了典型构件的研制周期。

正是基于复合材料的上述技术特点,积木式验证的理念也逐渐从民机向军机延伸,以保证复合材料结构满足设计和应用要求。积木式验证的方法是通用的,但在军民机上的应用重点不同。其核心思路是通过开展从复合材料的试样级、元件级、典型件到组合件和部件级的不同试验,实现由低级到高级、由简单到复杂、由部分到整体的结构设计及验证^[14]。

因此,要解决以碳纤维增强树脂基复合材料为代表的先进复合材料的高质量、高效率、低成本制造的问题,有必要基于国内外实践经验,吸收设计制造一体化、积木式验证等先进理念,对现有的复合材料构件研制流程进行优化。通过合理的研制流程,优化复合材料构件研制的资源配置、协调多角色配合与分工,并借助流程的并行或串行,提高研制效率。

2 现有标准现状

国外航空发达国家通过行业级标准、企业级标准和数据库等较全面地覆盖了碳纤维增强树脂基复合材料全生命周期,包括材料、设计与工艺、试验与检测、过程控制与认证等方面。中国目前形成了以国家标准、国家军用标准、航空行业标准、企业标准为主的标准基础,开展了对数据库建设的初步尝试。

2.1 国外标准现状

2.1.1 行业级标准

材料标准方面,以国际自动机工程师学会(Society of Automotive Engineers, SAE)发布和维护的航空航天材料规范(Aerospace Material Specifications, AMS)最具代表性^[15],这是中国在航空材料研制、生产和应用中参照的重要国外先进材料标准。经统计,复合材料相关的 AMS 标准近 500 项,其中与碳纤维增强树脂基复合材料相关的有 90 项,覆盖了环氧树脂、碳纤维及其织物、预浸料等主要类型(表 1)。AMS 标准系列化水平高,根据预浸料的种类、成分、性能等进行了较精细划分。通常以“通用+系列标准”的形式构建,如碳纤维材料规范 AMS 3892 系列标准等,通用标准规定了采购材料的基本要求,并明确材料分类方法。在具体系列标准中给出各个材料的详细性能指标,必要时配备合格产品目录(Qualified Products

List, QPL)。

表 1 SAE 发布和维护的相关标准数量

标准分类	标准数量/项
通用	1
材料	90
设计	4
工艺	8
修理	10
测试	6
过程控制	14

在设计与工艺标准方面,主要以国际协会标准为主。SAE 发布并维护的航空航天推荐准则(Aerospace Recommended Practices, ARP)、航空航天科研情报报告(Aerospace Information Reports, AIR)提供了适用于碳纤维增强树脂基复合材料的设计、工艺等方面支持,经统计约 12 项标准。设计标准包括对复合材料起落架、油箱及构件的可维修性设计,工艺包括复合材料的铺放、固化、混胶、机械加工和干燥等。

在试验与检测方面,国际标准化组织塑料技术委员会发布近 90 项关于环氧树脂、碳纤维、预浸料和复合材料的检测标准,并有数十项检测标准在编。美国试验与材料协会(American Society for Testing and Materials, ASTM)建立了近 100 项聚合物基复合材料性能测试方法标准,较完整涵盖其理化、无损检测和多层级力学性能试验,步骤要求详细、试验参数明确,同时标准修订更新快^[16]。

在修理标准方面,SAE 发布并维护的 ARP 和 AIR 提供了约 10 项相关标准,主要集中在修理工装、损伤识别、修理工艺、修理评估等方面,修理对象涉及蜂窝夹层结构、复合材料胶接结构、复合材料与金属连接结构等。

碳纤维增强树脂基复合材料的高变异性和工艺复杂性,使其性能相比传统航空金属具有更大的波动性,因此过程控制成为保证复合材料产品高质量交付不可或缺的重要环节^[6]。在过程控制与认证方面,SAE 发布的 AIR 标准提供了关于复合材料生产过程防护、材料储存、人员培训与认证、特殊过程认证及成本管理等多个方面的信息,共 14 项。在行业层面,质量评审协会(The Performance Review Institute, PRI)

作为 SAE 下的第三方独立审查协会,配合特殊过程审核,发布了 6 份非金属材料加工和复合材料制造的审核准则,涵盖预浸料、蜂窝芯、胶膜等原材料制造,以及自动铺放、液体成型、热压罐成型、机械加工连接等制造工艺^[17]。此外,在民用航空领域,美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)发布的咨询通告《复合材料飞机结构》(AC20-107)、《复合材料结构制造质量控制》(AC21-26)作为行业顶层管理文件,推荐了适用于民机复合材料结构设计、制造、质量控制的适航审定方法。

2.1.2 企业级标准

国外主要航空制造商如波音、空客等根据实际需求制定了企业级复合材料制造相关标准,并传递给大量转包供应商^[18],以实现复合材料制造过程的质量控制,以下结合波音的企业标准进行重点介绍。根据目前国内对波音标准的掌握情况,与碳纤维增强树脂基复合材料相关的标准主要包括材料标准(Boeing Material Specification, BMS),工艺规范(Boeing Process Specification, BAC),支撑标准(Specification Sup-

port Standard, BSS)等。各类型标准数量如表 2 所示, BAC 工艺规范占比高达 60.6%, BMS 和 BSS 标准数量相当。

表 2 与碳纤维增强树脂基复合材料相关的波音标准

标准类型	标准数量/项
BMS(Boeing Material Specification)	27
BAC(Boeing Process Specification)	77
BSS(Specification Support Standard)	23

波音企标中与碳纤维增强树脂基复合材料相关的标准的主要架构如图 4 所示。BMS 材料规范包括蜂窝芯、树脂、胶粘剂、纤维与织物、预浸料等相关材料规范。BAC 工艺规范包括铺放工艺、热压成型、机械连接、表面处理、密封、无损检测和质量控制等方面。BSS 支撑标准包括人员认证、设备批准、材料储存、预浸料及复合材料产品的理化、力学性能检测及无损检测,以及对产品的首件鉴定要求等方面。

BAC 工艺规范中,复合材料成型工艺往往与材料或产品类型紧密结合,如专门针对在不同温度(250°F

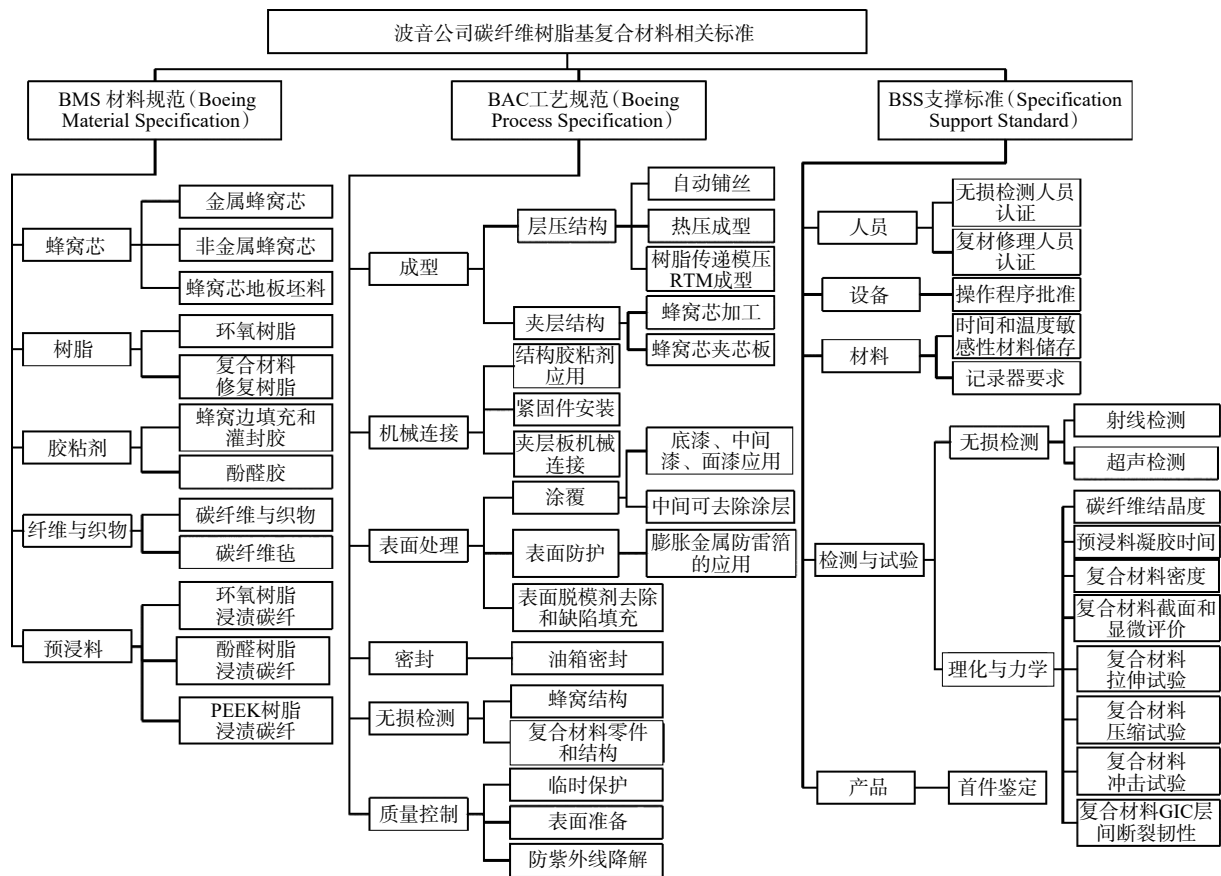


图 4 波音公司碳纤维增强树脂基复合材料相关标准架构

和 350°F 等)下固化的碳纤维增强增韧环氧树脂构件、穿孔碳纤维增强部件等的工艺规范。部分成型工艺同时匹配了相应的合格产品目录 QPL,如 BAC 5657 和对应的 BAC 5657 QPL 文件。

与此同时,2 大主制造商空客和波音针对复合材料结构设计,基于多个机型的设计应用经验,为技术人员制定了专门的复合材料设计手册。波音编制的设计手册对材料和工艺选择、铺层铺放、环境影响和防护、连接设计、紧固件选择、垫片选择、生产能力考虑、图纸要求等方面做了详细要求。技术人员依据标准和手册,实现了不同机型间复合材料设计技术的传承。

2.2 国内标准现状

2.2.1 行业级标准

经统计,截至 2025 年 9 月,国内与航空碳纤维增强树脂基复合材料相关的现行行业级以上标准数量如表 3 所示。在国家标准方面共有 94 项,以试验与检测标准为主,共 87 项,还包括材料类 3 项,设计与工艺类 3 项和通用类标准 1 项。大量的试验与检测标准基本覆盖了纤维、树脂、预浸料和复合材料的理化、力学性能测试及无损检测方法。鉴于国家标准的定位,其主要侧重于各个行业内通用性较高的试验与检测标准。

表 3 国内相关标准数量(项)

标准分类	国家标准	国家军用标准	航空行业标准
材料类	3	7	7
设计与工艺类	3	5	35
试验与检测类	87	16	32
修理类	/	/	1
过程控制类	/	/	7
其他	1	/	/

适用于航空碳纤维增强树脂基复合材料的现行国家军用标准共有 28 项,其中材料与产品类 7 项,包括碳纤维、织物等材料规范,以及碳纤维复合材料气瓶、衬套管等产品规范。设计与工艺类 5 项,包含复合材料的强度设计要求等。试验与检测类 16 项,涉及复合材料层合板的力学性能、疲劳性能、失效分析、无损检测等方面。整体来看,国家军用标准更加重视材料、产品规范以及相关的试验与检测标准。

目前适用于航空碳纤维增强树脂基复合材料的行业标准以航空行业标准为主,还有少量纺织和建筑行业标准。纺织行业现行标准约 7 项,主要规定了碳纤维的含水率、灰分、原丝残留溶剂等指标的测试方法。建筑行业标准约 3 项,主要涉及碳纤维生产用高温碳化炉和石墨化炉等技术条件。航空行业标准共 82 项,其中材料类 7 项,设计类 16 项,工艺类 19 项,试验与检测类 32 类,修理类 1 项,过程控制类 7 项。材料类标准主要对复合材料成型用密封胶条、脱模剂等辅助材料的通用要求进行规定。设计类标准主要对复合材料设计、制图及建模的通用要求进行规定。工艺类标准对工装设计、工装建模、成型工艺、机械加工、装配等的通用要求给出了规定。试验与检测类标准主要涵盖了对预浸料与层合板的理化、力学性能测试及无损检测。整体来看,航空行业标准对航空碳纤维增强树脂基复合材料的覆盖面更为全面,但面临更新不及时难题。经初步统计,2005 年以前发布的相关标准数量有 40 余项,占比超 50%,与现有技术发展有较大差距。

此外,国家层面上,适航部门对复合材料结构制造的质量及过程控制进行了规范。适航规章《民用航空产品和零部件合格审定规定》(CCAR-21)明确了材料生产商的质量体系和材料制造过程控制的相关要求。咨询通告《复合材料结构制造质量体系要求指南》(AC-21-AA-2017-29)提供了符合 CCAR-21 的复合材料结构制造质量体系要求。

2.2.2 企业级标准

针对碳纤维增强树脂基复合材料制造,国内中国航空工业集团有限公司(简称航空工业)、中国商飞等各大制造商也都针对性地建立了相关标准。航空工业将复合材料与制造标准作为航空产品实现的重要组成部分,规划制定了包括通用基础、材料、设计、工艺、工艺装备和试验检测 6 大类标准的上百项集团标准。每大类再按照具体类别进行细分,如材料分为原材料、中间体、复合材料和辅助材料,工艺分为成型、机械加工和其他,试验检测分为力学、理化、功能试验和无损检测等。

航空工业下各大主机厂基于型号研制与发展,形成相应的复合材料制造标准,并随着航空标准和复合材料应用发展而提升。以西飞为例,其航空复合材料

构件制造标准经历了参考借鉴国外标准、建立型号标准和重塑标准体系 3 个阶段^[7]。2016 年,在标准体系重塑过程中充分考虑适航理念,构建了一套以产品分族为特征、覆盖全业务流程的复合材料构件制造标准体系(图 5)。其将复合材料构件分为加筋壁板、梁/框

/肋、U 型制件、楔形组件、异型结构 5 大类,复合材料构件标准体系分为设计标准、工艺标准、维修/服务标准 3 大模块,其中每一个模块划分为管理类、技术类和手册类标准 3 部分,每一部分再按照业务域进行标准策划。

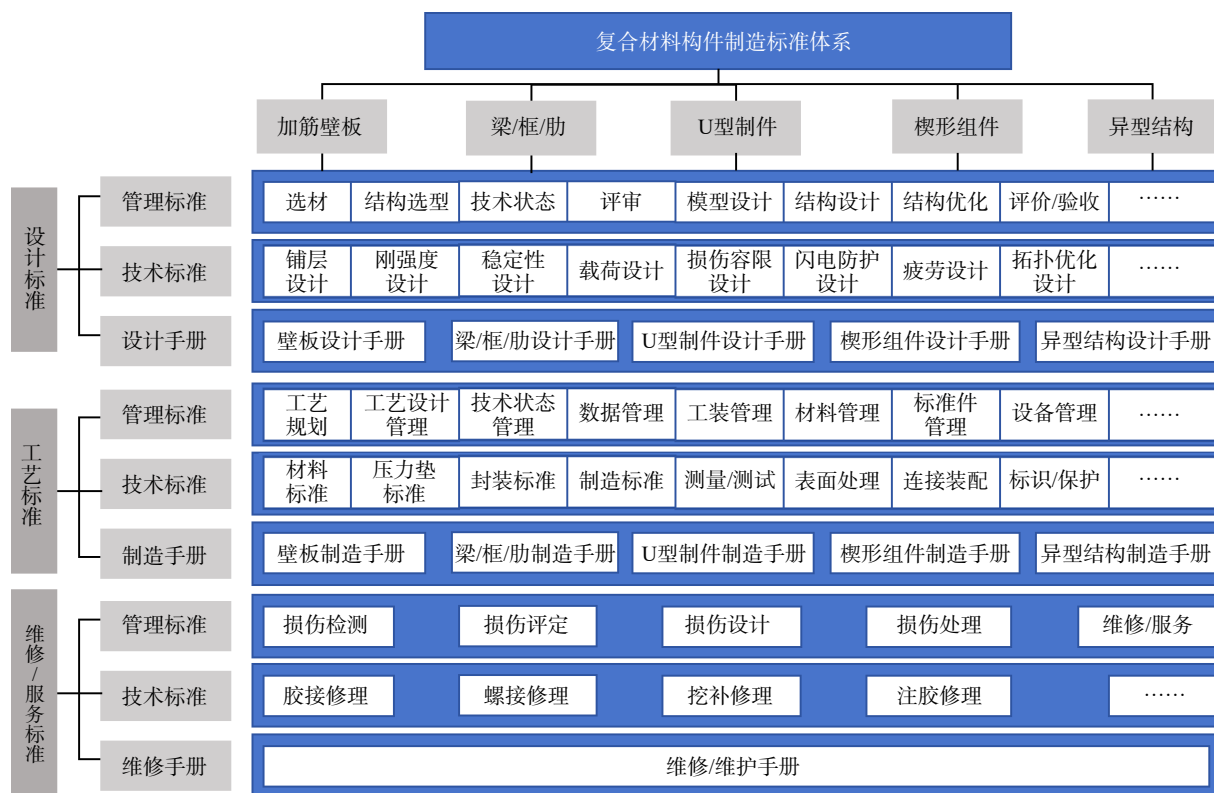


图 5 西飞复合材料构件制造标准体系框架

中国商飞基于 ARJ 21 和 C919 等型号需求,以复合材料专业技术体系为导向进行正向规划,策划形成包含上百项标准的复合材料标准体系。该标准体系按复合材料设计、材料与工艺等方面进行构建,其中复合材料设计标准覆盖静强度、动强度及疲劳损伤容限设计、复合材料结构维修等方面,材料与工艺标准覆盖材料开发、工艺验证、成型制造、过程控制等方面。

2.3 复合材料数据库国内外现状

复合材料的积木式验证基于多层级试验开展,通常试验量大、周期长、成本高。根据其技术特点,位于积木式验证底层的试样级、元件级试验在试验件、夹具、操作等方面具有良好通用性,试验数据的可共享程度较高^[19]。国外非常重视试样、元件级试验标准的通用性及试验数据的共享,有效避免不同单位对于

相同材料底层试验的重复,从而尽可能降低其验证成本^[20]。相关成果集中体现在复合材料手册(Composite Material Handbook, CMH-17)及国家先进材料性能中心(National Center for Advanced Materials Performance, NCAMP)数据库中。

CMH-17 手册在第二册中收录了应用成熟的、不同材料牌号的碳纤维增强树脂基预浸料单向带及织物等性能数据,最新的 CMH-17-2G 版收录了数十个牌号复合材料的 80 余项性能数据,构成行业级共享材料数据库。相应数据基于全程受控的材料生产、成型制造、机械加工、试验、数据收集、统计分析等环节和统一的试验标准获得,并按照审批流程收录到手册中。该手册同时提供了关于复合材料研制流程、设计、试验与检测等多方面的详细内容。

同时,为加快复合材料在通用航空领域的推广应

用,由美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、FAA、工业界等联合实施的先进通用航空运输试验计划(Advanced General Aviation Technology Experiments, AGATE),对复合材料进行认证并建立共享的材料性能数据库,后来演变成 NCAMP^[14],进一步向整个航空领域扩展。目前 NCAMP 数据库已收录几十种材料牌号数据,有效降低材料认证成本。

国内相关单位逐渐意识到复合材料基础数据积累和共享的重要性,已开展了数据共享的尝试并取得一定进展。各单位基于型号实践如直 X、C919 等形成了企业内部数据库。主干材料体系项目研究过程中形成的复合材料手册收录了数项航空主用碳纤维复合材料的性能数据,基于一套标准流程获取的数据具有可追溯性,但相关成果仅限于项目内部,且尚未收录近年来发展迅速的先进复合材料牌号。中国民航沈阳审定中心对标国外 NCAMP,联合江苏恒神股份有限公司、上海航空材料结构检测股份有限公司和山河星航实业股份有限公司等单位,探索建立适用于中国的通航用国产复合材料性能共享数据库^[21],目前仅完成首批 2 种材料的全部性能数据测试和技术文件编制。

3 国内标准现存问题

基于对国内外航空碳纤维增强树脂基复合材料标准现状的分析,立足于航空碳纤维复合材料制造的全生命周期,国内现行标准及其应用主要存在以下几方面突出问题。

1) 现行行业级标准不成体系,企业级标准体系结构不一。完整的标准体系应涵盖产业链全环节,才能充分发挥其体系化效益。根据前文,国内现行行业级标准较多集中于碳纤维增强树脂基复合材料的性能检测,在材料、设计、制造、维修等方面存在较大标准缺口^[22],难以满足复合材料研制和应用的需要。从企业级标准来看,中国商飞、航空工业、西飞等企业复合材料制造标准体系的构建思路和内容不完全相同,体系结构不一致,由此会增加行业内各单位间数据交换、产品标准化交付的成本,不利于资源共享和形成行业发展合力。

2) 同一标准化对象存在不同层级的标准,技术指标存在差异。针对部分标准化对象,存在国家标准、国家军用标准、行业标准等不同层级标准并存的现象,且各层级标准的技术指标和要素存在一定差异,尤其在设计标准、试验与检测标准方面更为突出。例如,军用飞机复合材料结构设计方面同时存在于国家军用标准和行业标准,《军用飞机结构强度规范 第 14 部分:复合材料结构》(GJB 67.14—2008)和《军用飞机复合材料结构设计指南》(HB_Z 322—1998)两份标准中对复合材料结构疲劳耐久性和损伤容限设计时初始缺陷和剩余强度的规定存在显著不一致。复合材料压缩试验标准同时存在于国家标准和航空行业标准,《纤维增强塑料面内压缩性能试验方法》(GB/T 5258—2008)和《碳纤维增强树脂基复合材料薄板压缩性能试验方法》(HB 5485—1991)在试样尺寸、加载速率等技术要素方面存在一定差异。相关标准在技术参数上的差异,使得上下游单位如设计、材料制造和构件生产单位等应用不同标准时产生实际做法的差异,加剧了复合材料设计与验证的成本。

3) 部分标准规定的参数粗放、细节缺失,指导性不强。国内现行标准的许多条款通常给出原则性指导,试验与检测标准、维修标准等部分条款内容过于粗放、细节缺失,缺乏技术深度,对技术人员的指导作用不充分,可操作性不强。国外 ASTM 标准重视试验干扰因素、试验偏差等对试验结果的影响,而国内检测标准在相关方面存在严重缺失,本质原因是不重视对试验方法的系统性研究。例如,《树脂基复合材料制件修补工艺》(HB/Z 410—2013(2017))规定了实体件、蜂窝以及胶接的典型缺陷及修补方法,但缺少损伤容限判断等相关数据的支撑。《碳纤维复合材料层合板冲击后压缩试验方法》(HB 6739—1993)未明确规定单层板及层合板的铺层方式,缺乏试样与压缩夹具装配等方面的细节支持。

4) 部分标准久未更新,支撑结构试验、虚拟试验等技术发展的标准存在缺口。国外 AMS、ASTM 等协会标准时效性强、更新速度快,而国内部分国家军用标准、航空行业标准久不更新,无法满足技术发展需要。AMS 有效标准复审确认的周期为 2~3 年^[18],ASTM 每 4 年对现有标准进行一次审查,使其能及时根据技术发展对标准进行修订和更新。国内部分标

准仍停留于 20 世纪 80、90 年代,标准所承载的技术要求已无法适应先进复合材料技术发展的需要,对先进材料、先进设备、数字化技术等规范和指导作用远远不够。如《复合材料构件制图规定》(HB 5859.2—1992)是对二维制图的要求和规定,无法适应现在以三维图为主的实际需求。《碳纤维复合材料层合板 I 型层间断裂韧性 GIC 试验方法》(HB 7402—1996)等标准也具有类似问题。

几十年来复合材料相关技术迅猛发展,现行标准对新技术的迎合和引领较为滞后。随着大飞机项目的开展,复合材料厚板面临大规模应用的实际需求,适用于先进复合材料厚板结构的许用值试验技术尚处于研究阶段,相关标准基本为空白。同时,复合材料典型件层级以上的结构强度试验、特种试验等主要依据《运输类飞机适航标准》(CCAR-25)及设计要求等开展,缺乏行业层级通用要求。此外,基于数字化技术的复合材料虚拟试验能够显著减少试验量、降低试验验证成本,而目前也缺乏相应规范。

5) 底层通用数据库欠缺,行业内共享机制未形成。以碳纤维增强树脂基复合材料为代表的先进复合材料在军民机上实现大量应用,依靠的是大量的积木式试验为其安全性、可靠性提供的数据支撑。通过对底层积木式试验数据的共享共用,可大幅度地降低复合材料验证成本,加快材料研制与应用进度。然而,截至目前,国内尚未形成覆盖面广、共享共用的行业级通用复合材料数据库,行业内共享机制未形成。各单位依托型号独立开展积木式试验导致部分试验不断被重复进行,由于材料来源复杂、试验方法不一、知识产权保护等原因导致试验数据共享难度大,验证成本居高不下,不利于材料推广应用。

4 标准体系框架构建

根据航空碳纤维增强树脂基复合材料制造的技术特点,基于标准现状及存在的问题,亟需立足于复合材料构件制造的全生命周期流程,进行顶层系统规划,构建“设计-制造-试验检测-过程控制与认证-应用维修”闭环的行业级航空碳纤维增强树脂基复合材料构件制造标准体系框架。本文结合先进技术发展趋势,以航空碳纤维增强树脂基复合材料典型构件的

产品实现为核心目标,基于复合材料构件制造全生命周期活动的不同阶段进行标准体系的解构,以时间维度为主线,按程序标准、技术标准、通用手册的不同层级构建起标准体系框架,如图 6 所示。

充分考虑碳纤维增强树脂基复合材料在航空器中的应用,选取壁板、梁、肋、端框和地板等典型构件,作为标准体系架构的落地对象。针对航空复合材料构件研制建立相应程序标准,吸收国内外复合材料构件研制的先进实践经验,如在设计早期阶段引入预生产制造、预生产验证的做法,同时将积木式验证的理念引入到结构的迭代验证中。该程序的建立有助于在行业内贯彻设计制造一体化的先进理念,在型号研制的方案设计阶段即开展积木式试验以验证材料、设计和制造方案,打通设计与制造之间的壁垒,在研制初期从根源上解决问题,避免大面积投产带来的浪费,提高复合材料构件研制效率。这一做法已被西飞应用并产生极大价值。西飞通过一套基于适航理念的复合材料构件正向研制流程,将某机型的制造周期由原来 15 个月缩短至 9 个月,同时产品制造质量大幅提升,拒收数量、报废数量分别下降 32% 和 67%,制造故障下降 37.5%^[7]。

技术标准是对程序标准的承接。根据对复合材料构件制造主要阶段和技术活动的分解,以材料研制、构件研制、批量生产和应用维修 4 个阶段为基础构建技术标准。(1) 材料研制阶段,应建立碳纤维、树脂、预浸料、工艺材料等的材料规范,同时配套相应的材料性能手册/数据库,为行业发展提供基础数据。(2) 构件研制阶段,其技术活动可分为构件设计、构件制造、试验验证和仿真分析 4 条并行路线,分别建立相应标准。构件设计主要考虑典型结构设计、设计选材、结构强度和刚度设计、耐久性与损伤容限设计、雷电防护设计、可制造性设计、可维修性设计等。构件制造方面主要包括纤维铺放、热压成型、液体成型、表面处理、机械加工、工装设计与制造、构件技术要求等方面。试验验证方面,遵循积木式验证的整体思路,分别对试样级、元件级、典型件和部件级试验制定试验标准,同时考虑在线检测和无损检测等产品检测标准。仿真分析方面,适应数字化技术发展趋势,主要考虑设计仿真、工艺仿真和试验仿真等标准。同时,配套建立相应的设计手册、制造

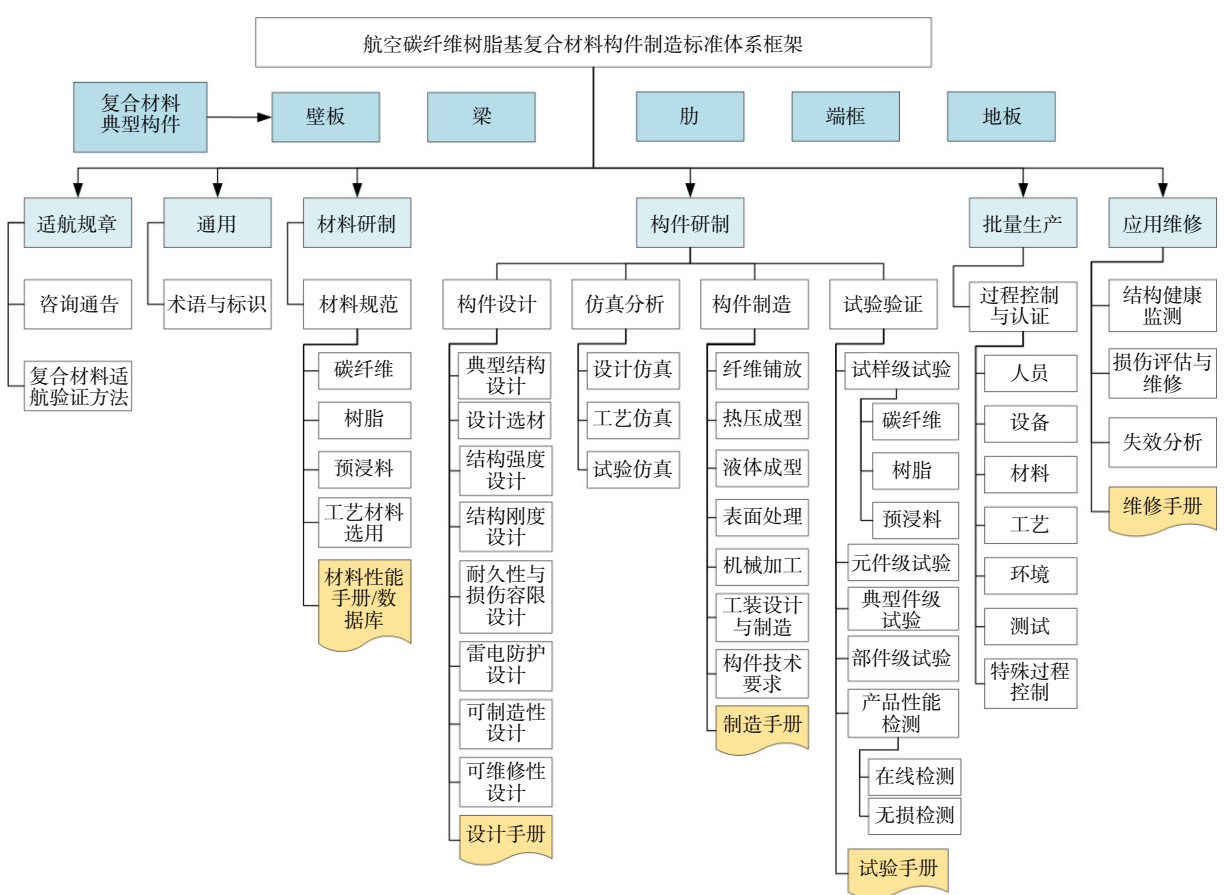


图6 航空碳纤维增强树脂基复合材料构件制造标准体系框架

手册和试验手册,为设计、制造和试验人员提供具体案例指导。(3) 批量生产阶段,主要考虑过程控制与认证相关标准,覆盖人员、设备、材料、工艺、环境、测试、特殊过程控制等方面。(4) 应用维修阶段,主要考虑结构健康监测、损伤评估与维修、失效分析等方面,同时配套维修手册为维修人员提供具体案例支持。此外,建立术语与标识等通用标准为技术标准提供统一的语义基础。

针对民机复合材料构件研制,以顶层适航规章如《正常类飞机适航规定》(CCAR-23)、《运输类飞机适航标准》(CCAR-25)等作为标准体系的顶层输入,对民机复合材料结构的安全性和可靠性进行规范与保障。进一步,承接适航规章要求,研究建立具有可操作性的复合材料结构验证方法标准。

通过以程序标准规范和约束航空碳纤维增强树脂基复合材料构件研制流程,以技术标准贯穿材料研制、构件研制、批量生产和应用维修的全生命周期活动,以通用性手册为技术人员提供具体案例指导,同时针对民机复合材料发展以顶层适航规章奠定发展

基调,构建起层次分明、重点突出的标准体系框架,有助于解决复合材料在技术和管理中面临的问题,助推技术发展、资源共享和工程化应用。

5 结论

在深入研究以航空碳纤维增强树脂基复合材料为代表的先进复合材料构件的全生命周期活动和研制特点的基础上,开展了基于全生命周期的航空碳纤维增强树脂基复合材料构件制造标准体系构建研究,得到以下结论。

1) 国外航空发达国家通过行业级、企业级标准和数据库等较全面地覆盖了碳纤维增强树脂基复合材料的全生命周期,相比之下中国虽开展了对复合材料数据库的尝试,并形成了一定数量的以国家标准、国家军用标准、航空行业标准、企业标准为主的标准基础,但仍面临标准不成体系、部分标准缺失、更新不及时、细节不充分等问题,不能适应先进碳纤维增强树脂基复合材料的技术发展需求。亟需立足顶层,

进行标准体系的规划。

2) 结合技术发展趋势,以航空碳纤维增强树脂基复合材料典型构件的产品实现为目标,以复合材料构件制造活动为主线,以程序标准、技术标准、通用手册的不同层级构建起“设计-制造-试验检测-过程控制与认证-应用维修”闭环的标准体系框架,有助于解决复合材料在技术和管理方面的问题,助推技术发展、资源共享和复合材料的广泛应用。

3) 该标准体系框架的构建,可为高性能碳纤维增强树脂基复合材料构件的高质量、高效率 and 低成本制造提供有力支撑。后续还应重点开展以下几方面工作。第一,在此框架基础上,根据行业实际需求,结合标准的适用性分析,制定标准清单。第二,加强对标准中技术指标的对比分析,建立统一技术基线。第三,在深化研究的基础上,提升试验检测、维修等标准的技术深度和可操作性。第四,重视对行业级标准的更新维护,且标准制定应充分考虑先进技术发展趋势,以保障其先进性和生命力。

4) 未来,该标准体系框架可根据实际需要,扩展到航空用树脂基复合材料,乃至航空用复合材料的范畴,以充分满足复合材料产业发展的需要。

参考文献(References)

- [1] 马志阳,高丽敏,徐吉峰. 复合材料在大飞机主承力结构上的应用与发展趋势[J]. [航空制造技术](#), 2021, 64(11): 24-30.
- [2] 袁晓龙,田卫,高兰宁. 大型复合材料主承力构件制造技术综述[J]. [航空制造技术](#), 2009, 52(22): 32-35.
- [3] 杨洋,袁宇慧. 从新材料、新工艺看复合材料的发展[J]. [大飞机](#), 2025(6): 22-26.
- [4] 贾晓龙,还献华,齐鹏飞,等. 碳纤维树脂基复合材料的高性能化[J]. [科学通报](#), 2018, 63(34): 3555-3569.
- [5] 邢丽英,包建文,礼嵩明,等. 先进树脂基复合材料发展现状和面临的挑战[J]. [复合材料学报](#), 2016, 33(7): 1327-1338.
- [6] 陈秋飞,郭鹏宗,张建峰,等. 民机材料过程控制在碳纤维产业中的应用进展[J]. [高科技纤维与应用](#), 2022, 47(5): 25-30.
- [7] 苏霞,朱攀星,胡大豹,等. 中航西飞复合材料构件制造标准浅谈[J]. [航空标准化与质量](#), 2022(2): 4-9.
- [8] 段敏鸽,刘存喜. 飞机复合材料结构适航符合性验证思路研究[J]. [航空科学技术](#), 2015, 26(3): 54-58.
- [9] 肖辉江,周良道,王栋,等. 基于“双一体化”的复合材料研制管理变革: 中国商飞复合材料中心管理模式探索与成效[C]//2023中国企业改革发展峰会暨成果发布会论文集. 2024: 347-353.
- [10] 张桂书,沈冰峰,唐云洋,等. 民用飞机复合材料零组件损伤失效分析过程和方法的探究[J]. [复合材料科学与工程](#), 2024(10): 97-102.
- [11] 张桂书,程胜,万佳佳,等. 民用飞机复合材料构件损伤失效分析在批产质量优化中的探索[J]. [复合材料科学与工程](#), 2025(5): 142-148.
- [12] 陈建奎,杨程丽,寇洁. 基于全过程的航空复合材料制件制造标准体系研究与构建[J]. [航空标准化与质量](#), 2022(3): 25-29.
- [13] 昌飞集团. 航空工业昌飞成为中国商飞首家PPV供应商[J]. [中国军转民](#), 2018(4): 6.
- [14] 林建鸿. 积木式方法与试验金字塔的历史沿革与发展趋势[J]. [航空工程进展](#), 2023, 14(5): 8-18.
- [15] 金海鹏,袁文明. 国外航空材料标准现状分析[J]. [航空标准化与质量](#), 2021(2): 47-50.
- [16] 潘星. 聚合物基复合材料的力学性能测试方法[J]. [理化检验\(物理分册\)](#), 2023, 59(9): 69-74.
- [17] 李彩云. Nadcap认证在国际民用飞机生产过程中的重要作用[J]. [科技创新导报](#), 2010, 7(27): 252.
- [18] 袁文明. 美国AMS标准及其体系简析[J]. [航空标准化与质量](#), 2007(3): 37-40.
- [19] 沈真,史有好,李国明. 复合材料共享数据库[J]. [新材料产业](#), 2012(2): 11-14.
- [20] 沈薇,杨胜春,沈真. 复合材料力学性能表征标准化研究新进展[J]. [航空制造技术](#), 2009(增刊1): 25-27.
- [21] 刘秀芝. 论通航用国产复合材料性能“共享数据库”建立[J]. [新能源航空](#), 2023, 1(3): 19-27.
- [22] 陈芸,刘焕君,杨喆,等. 航空树脂基复合材料标准现状及发展探讨[J]. [冶金标准化与质量](#), 2022, 60(2): 40-43.

Research on the standard system for the manufacturing of aviation carbon fiber reinforced resin matrix composite components towards the entire life cycle

FAN Jie, WANG Juntao, YAN Min, ZHANG Lu, FENG Bing

China Aero Polytechnical Establishment, Beijing 100028, China

Abstract The manufacturing of carbon fiber reinforced resin matrix composite components with high-quality, high-efficiency, and low-cost is of great significance for their wide application in aviation and other fields. The manufacturing of composite components is special for its multi-stage, multi-variation and sensitivity to process. Facing the gap in quality stability and cost of carbon fiber composite components, in order to promote the development and application of advanced composite materials, it is necessary to establish a industry-level standard system which covers the composite component development management and the entire life cycle of composite component manufacturing. This article deeply studies the life cycle activities and development characteristics of advanced composite component manufacturing, comprehensively summarizes the current status of relevant standards at home and abroad, and deeply analyzes the problems existing in domestic standards. Compared with the developed countries abroad in aviation that have comprehensively built industry-level, enterprise-level standards and databases to cover the entire life cycle of carbon fiber reinforced resin matrix composites, China has already established a certain standard foundation. However, it still faces problems such as an incomplete standard system, missing standards in some areas and untimely standard updates, which cannot meet the needs of advanced technology development. Considering the entire life cycle of carbon fiber reinforced resin matrix composite manufacturing, focusing on the product realization of aviation composite components, a framework of the industry-level standard system with the closed loop of "design-manufacturing-testing-process control and certification-application and maintenance" is constructed in this article to provide strong support for the technology development and application promotion of carbon fiber reinforced resin matrix composite materials.

Keywords carbon fiber reinforced resin matrix composite; component manufacturing; entire life cycle; development management; standard system ●



(责任编辑 刘洋)