

# 高性能复合材料在直升机结构上的应用展望

谌广昌<sup>1,2</sup>, 吴明忠<sup>2</sup>, 陈普会<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016;

2. 中国直升机设计研究所, 景德镇 333001)

**[摘要]** 出于减重和效率提升等目的, 纤维增强复合材料在直升机结构上的用量日益增加。阐述了直升机结构设计特点与高性能复合材料应用的最佳匹配性, 介绍了国外直升机复合材料典型应用案例与发展趋势, 总结了国内直升机复合材料应用现状与国外差距, 展望了高性能复合材料未来技术需求。研究表明, 国内直升机复合材料应用对比欧美国家存在技术代差; 高性能结构复合材料、先进功能复合材料、结构功能一体化复合材料、低成本复合材料整体成型及复合材料高置信度虚拟认证技术是未来发展重点。

**关键词:** 高性能复合材料; 直升机; 结构; 技术代差

## Application Predication of Higher-Performance Composites in Rotorcraft Structures

CHEN Guangchang<sup>1,2</sup>, WU Mingzhong<sup>2</sup>, CHEN Puhui<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezheng 333001, China)

**[ABSTRACT]** Fiber-reinforced composite materials are increasingly used in the rotorcraft structures to reduce weight and improve efficiency. The rotorcraft industry is constantly in need of higher-performance materials that offer improved mechanical strength and stiffness at a lower weight. This work introduces the composite materials typical application cases and development trends of foreign rotorcraft structures and summarizes the state-of-the-art of civil rotorcraft composite structures, also presents the future technical requirements of higher-performance composites. The overview shows that there exist technical gaps for rotorcraft composite applications between the civil and western. The conclusion shows that higher-performance structural composites, advanced functional composites, structural and functional integrated composite materials, low-cost composite integrated technologies and high-confidence virtual validation technologies of composites will be the future focus.

**Keywords:** Higher-performance composite material; Rotorcraft; Structure; Technical gap

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.12.083

因复合材料的出现和大规模应用, 飞机设计制造正在走向一条变革之道<sup>[1]</sup>。树脂基复合材料具有高比模、高比强、可设计、抗疲劳、耐腐蚀等诸多优势, 是提升直升机结构重量寿命效益的最佳选择, 有助于提升型号的可靠性、安全性、维修性和可靠性, 替代现有金属用于直升机结构设计制造将显著降低型号产品全寿命周期成本<sup>[2-6]</sup>。先进复合材料如智能纤维复合材料(Macro Fiber Composites, MFC)和保护性蒙皮(Protective Skin, PS)等的技术发展将进一步驱动自适应/智能旋翼等直升机结构承载功能一体化设计技术的发展<sup>[7-11]</sup>。自20世纪60年代始高强玻纤复合材料旋翼桨叶研制

成功, 实现在直升机结构上的突破性应用进展后<sup>[12]</sup>, 近几十年来, 各大直升机原始设备制造商竞相开展各类结构的复合材料应用研究, 涌现了以V-280、H-160等为代表的复合材料军民两用直升机<sup>[13-16]</sup>。

## 1 直升机结构设计特点

直升机低空低速飞行器的任务特性, 与高空高速固定翼飞机存在显著区别, 主要体现在飞行高度一般在3000m以下, 甚至在一树之高15~30m之间, 巡航速度约在280km/h, 舰载直升机甚至常低空掠海飞行, 因此其服役环境极其恶劣, 主要为湿/热、干/寒、沙尘/雨

淋及海水等自然环境条件<sup>[17]</sup>。直升机结构选用具有较优耐候性和耐腐蚀性的复合材料,是其环境适应性设计的最佳选择,可满足在上述不同地域、不同自然环境条件下的苛刻使用要求。同时,直升机的最大特点在于其拥有旋翼,旋翼作为直升机独有的动部件,其动力响应产生高周疲劳环境,且直升机在地空地循环效应诱发下存在低周疲劳环境,因此选用具有最佳抗疲劳特性的复合材料将是直升机追求结构效益的最有效途径<sup>[18-21]</sup>。

直升机结构通常划分为旋翼系统、机体结构和起落架 3 大类。旋翼系统是直升机的独有技术,包括主旋翼和尾桨,是直升机升力面和操纵面,也是直升机特有的关键动部件。旋翼系统动部件以调频和疲劳强度设计为主,复合材料因其刚度可剪裁特性和优异的疲劳性能被率先选用,并由此带来可观的寿命经济效益<sup>[22-23]</sup>。旋翼桨毂受力复杂,其结构、重量、可靠性和维修性一直是设计制造运营等利益攸关方的重点关注点,采用复合材料将带来明显的减重效应,更重要的是可以实现星型柔性桨毂及无轴承桨毂等新构型设计制造,简化桨毂构造、减少零件数目<sup>[24-27]</sup>。

机体结构是整个直升机的基础,用于支撑和固定直升机的其他部件,如传动系统、发动机系统等,也用于安置机组人员、乘员、设备和货物等。机体结构采用复合材料主要考虑:一方面,直升机外形曲面多为薄壁复杂曲面,但结构受载不大,适宜采用复合材料蜂窝夹层结构,以提高结构刚度及损伤容限,使用安装可靠;同时着眼于结构减重,复合材料用量与机体结构设计重量系数指标密切相关;另一方面积极改进和创新结构设计及制造工艺,如结构抗冲击防雷击腐蚀防护一体化蒙皮、主动抗坠毁防护结构和自动铺带结合非热压罐原位加温加压固化高生存力热塑性复合材料尾梁等<sup>[28-30]</sup>。

起落架是在直升机起降过程和地面运动时提供缓冲功能的重要承力部件,其主要作用是吸收着陆冲击能量、控制着陆过载、传递地面载荷。起落架采用复合材料替代超高强度钢,主要基于减重和降低成本考虑,为克服复合材料抗冲击性能差、横向强度和层间剪切强度低等缺点,荷兰航空宇航研究院采用三维编织和 RTM 工艺,完成了 NH90 直升机起落架摇臂和扭力臂的制备<sup>[31-35]</sup>。

## 2 国外技术现状与发展趋势

基于复合材料高比强度和高比模量带来的减重优势,铺层剪裁设计性可在不同方向产生所需力学性能、可制备表面高光滑度的复杂双曲率部件以达到气动减阻效应、可整体成型减少部件数量降低生产成本及较优耐腐蚀和耐化学物质特性等诸多优点,复合材料在直升机结构设计制造上日趋重要。

从 20 世纪 60 年代替代铝合金制造直升机整流罩等次承力部件开始,以 NASA 兰利研究中心、波音、西科斯基及空直等为代表的欧美直升机工业设计研发机构持续投入巨资开展高性能复合材料直升机应用项目,如旋翼结构技术验证项目(The Rotary Wing Structures Technology Demonstration Program, RWSTDP)、先进复合材料机体结构(Advanced Composite Airframe Program, ACAP)及高生存低成本可修复机体结构项目(Survivable Affordable Repairable Airframe Program, SARAP)等<sup>[36-39]</sup>,这些项目的开展使得欧美发达国家在直升机复合材料的研制、设计和制造水平处于领先地位,复合材料应用程度大幅提升,虎式(Tiger)武装直升机及 NH-90、CH-53K 中大型军用运输直升机的复合材料用量占结构的重量比均在 90% 以上,如图 1 所示<sup>[14]</sup>。

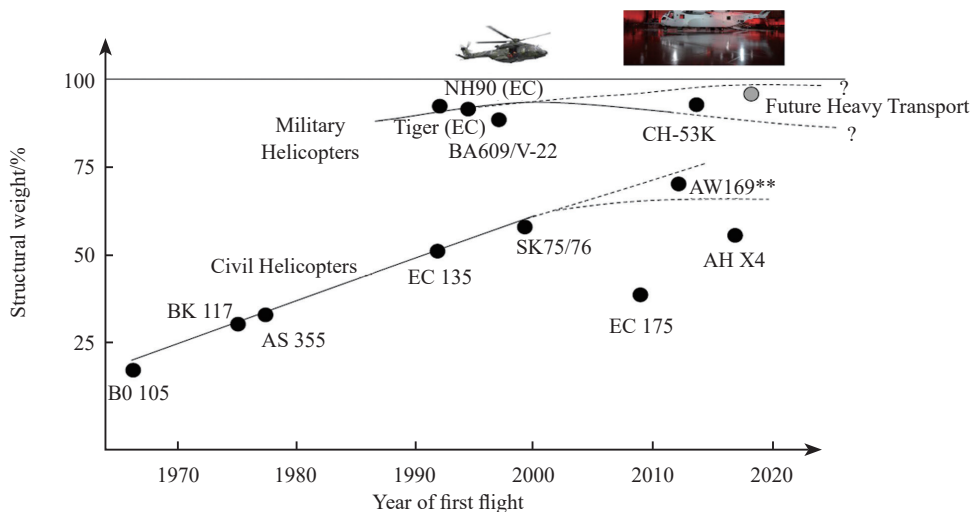


图1 西方军民用直升机复合材料占结构重量比示意

Fig.1 Composites weight ratios of structures for western military and civilian helicopter

## 2.1 典型应用案例

本文将分别以欧美主流直升机研发机构正在开展研制的未来垂直升力(Future Vertical Lift, FVL)先导项目联合多用途旋翼机技术验证机(Joint-Multi Rotorcraft-Technology Demonstrator, JMR-TD)、CH-53K 重型军用运输直升机和 H-160 中型民用直升等为案例,介绍国外直升机结构复合材料最新应用情况。

### 2.1.1 FVL-JMR TD

FVL 是由美国陆军航空卓越中心负责牵头的国防部联合研发活动,主要用于取代现有的美国陆军和海军陆战队 H-1 和 H-60 机队,以一种机型满足其在 2030 年左右对于直升机武装攻击和通用运输作战任务需求,降低美军直升机机队研发、使用和维护成本<sup>[40]</sup>。先导项目 JMR TD 的总体目标是促进 FVL 关键飞行技术的成熟,参与该项目招标的有 AVX 公司、Karem Aircraft 公司、Bell 公司及 Sikorsky 公司<sup>[41-45]</sup>,最终入选 JMR TD-飞行器概念验证项目(Air Vehicle Concept Demonstrator, AVCD)为 Boeing 公司的共轴高速直升机 SB-1“无畏”及 Sikorsky 和 Bell 公司联合研制的新一代倾转旋翼机 V-280“勇士”<sup>[46-48]</sup>。

SB-1 型机旋翼桨叶采用自动纤维铺放技术(Automated Fiber Placement, AFP)制造,该技术源自于 V-22 鱼鹰机身蒙皮和波音 787 梦幻客机,如图 2 所示。AFP 采用机器头沿芯轴铺放碳纤维带制备主桨叶大梁,然后将大梁放置于工装后热压罐固化。相比传统手工铺放复合材料大梁,该技术可减少桨叶-桨叶间离散性、减少缺陷数量和降低桨叶制造劳动力成本,同时该工艺可提供性能更加稳定无胶接接头的大梁及缩短桨叶生产周期。大梁提供旋翼主桨叶所需的刚度和频率布置,AFP 提供的设计自由度给予了桨叶采用传统复合材料手工铺层难以达到的结构性能。为达到减重、降低成本和改善维护性目标,SB-1 型机机体结构采用了前期预研和 787 商业飞机项目上的先进工艺、技术和经验,减重通过采用包括具有更高比强度、比模量和高韧性复合材料的新一代材料技术,如图 3 所示。其中一项技术为机器人钻孔和紧固件安装技术,相比传统手工钻孔和安装技术,成本可下降 50%,不合格率下降 90%。

V-280 型机为 Bell 公司第三代倾转旋翼机,设计之初即将更多精力放置于低成本和可靠的设计简化上,机翼的设计和制造通过采用设计制造一体化、先进材料、自动制造工艺及低成本研发工具实现了研发和经常性成本的显著降低;机翼蒙皮、大梁和肋采用了基于 IM10 碳纤维环氧宽幅预浸料及大尺寸碳纤维蜂窝芯材实现了手工铺放制造,如图 4 所示。基于高性能室温固化糊状胶实现了蒙皮与肋的胶接装配,如图 5 所示<sup>[49]</sup>。

通过上述措施,可节约昂贵的固定设备投资及维护费用,总劳动力成本下降 57%,研发工具成本下降 50%,机械连接紧固件减少了 95%。

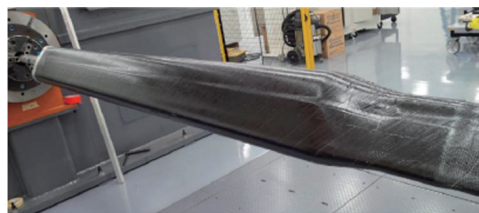


图2 SB-1型机复合材料应用案例: 桨叶AFP技术  
Fig.2 Composites application cases of SB-1: AFP of blade



图3 SB-1型机复合材料应用案例: 先进复合材料机体结构  
Fig.3 Composites application cases of SB-1: advanced composite airframe structure

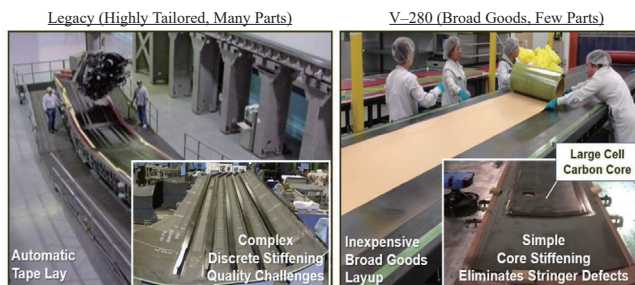


图4 V-280机翼制造: 宽幅预浸料手工铺层  
Fig.4 Wing manufacturing of V-280: handing-layup of broad prepreg



图5 V-280机翼制造: 蒙皮与肋胶接  
Fig.5 Wing manufacturing of V-280: bonding between skin and ribs

2.1.2 CH-53K

CH-53K 是由 Sikorsky 飞机公司 2006 年开始为美国海军陆战队研发的一款新型重型直升机,用于替换老旧的 CH-53E 直升机机队,预计在 2019 年形成初始作战能力,2029 年形成完整作战能力。CH-53K 的设计目标为外载荷 12246.9kg、航程 203.72km,在同等航程下外载荷超出 CH-53E 的 3 倍,为达到该设计目标, Sikorsky 圈定了 5 大关键技术:GE 38 7500 涡轴发动机、第四代旋翼桨叶、转矩分流传动、线传飞控和创新轻质复合材料结构<sup>[50]</sup>。

CH-53K 型机创新轻质复合材料结构技术的典型代表为无轴承尾桨复合材料柔性梁。复合材料柔性梁是尾桨飞行关键部件,将每片桨叶的大梁和上下蒙皮连接到尾桨轴。结构尺寸达 1626mm × 343mm × 76mm,需要铺覆 737 层数的预浸料,结构构型呈狗骨头状,且沿中轴 9° 扭转,如图 6 所示。结构形式复杂且铺层数量过多,采用传统手工铺层存在工时数多及产品合格率低导致的生产成本极高等问题。为解决上述问题,2011 年海军航空司令部授予了 Accudyne 系统公司的小企业创新研究(Small Business Innovation Research, SBIR)合同,开发 CH-53K 尾旋翼柔性梁自动铺层技术,如图 7 所示<sup>[51]</sup>。

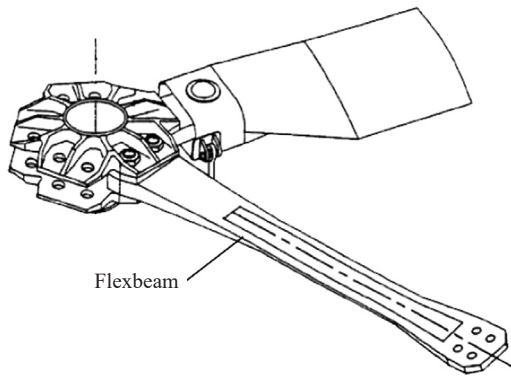


图6 CH-53K型机无轴承尾旋翼柔性梁示意图  
Fig.6 Bearingless tail rotor of CH-53K flexible beam



图7 CH-53K型机无轴承尾旋翼:自动铺层设备示意图  
Fig.7 Bearingless tail rotor of CH-53K ATP equipment

2.1.3 H-160

H-160 直升机为空直公司研发的最新型双发 6t 级中型民用直升机,也是迄今为止世界上第 1 架全复合材料民用直升机。目前正处于研发和取证的最后阶段,预计首架机交付节点为 2019 年,该型机采用球柔性旋翼构型。

球柔性旋翼核心关键件桨毂中央件受力复杂,承受离心力、主旋翼扭矩、升力、旋转弯矩及剪切载荷。空直现有型号如 H-175 型机等均采用钛合金制备桨毂中央件,寿命 4500Fh,而直升机全寿命周期一般为 10000Fh,为达到减少维护需求,最大程度地增加乘客安全的设计目标,空直公司在 H-160 型机上采用碳纤维增强 PEEK 复合材料代替钛合金设计制备桨毂中央件,PEEK 树脂是目前已知商业化树脂牌号中抗剪切和耐疲劳性能最优的树脂,与直升机复合材料结构现有常用环氧树脂的性能对比如图 8 所示。H-160 型机热塑性复合材料主旋翼桨毂是全世界首个按照新版 FAA/EASA 27.573 《复合材料旋翼航空器的损伤容限和疲劳评定》开展适航符合性认证的新技术,其积木式认证程序如图 9 所示<sup>[52]</sup>。

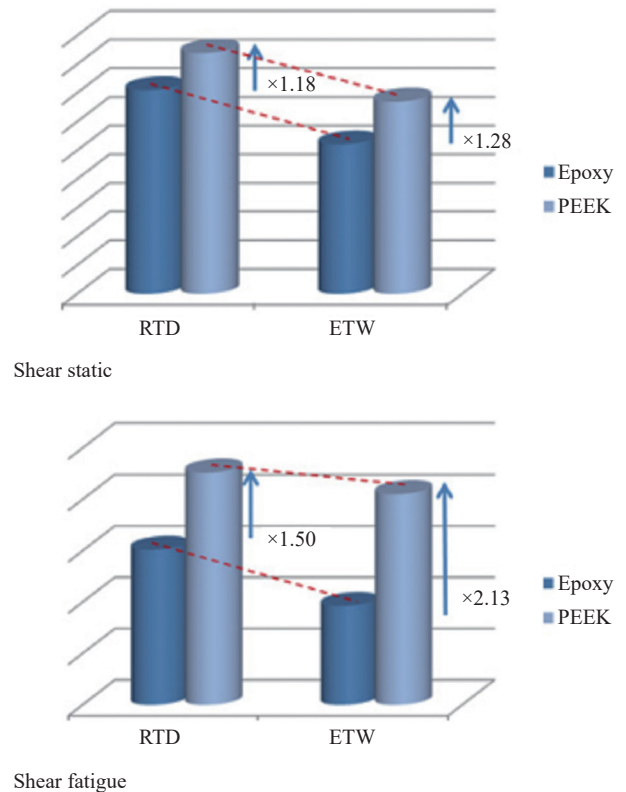


图8 H-160直升机热塑性复合材料桨毂中央件: PEEK与环氧性能对比  
Fig.8 Thermoplastic composite rotor hub of H-160: comparison of PEEK and epoxy

## 2.2 发展趋势

综合上述近年来国外先进直升机的复合材料应用情况,表明未来复合材料在直升机发展中的地位将更加重要,未来直升机复合材料总体发展方向是高性能化和高稳定性、结构承载与功能一体、设计制造全球一体化、全寿命周期低成本化、智能化协调发展,其发展趋势展望如下。

### 2.2.1 高性能化和高稳定性

直升机独有的旋翼系统复杂振动特性,引发载机平台结构会产生严酷的刚度、疲劳及寿命问题,对复合材

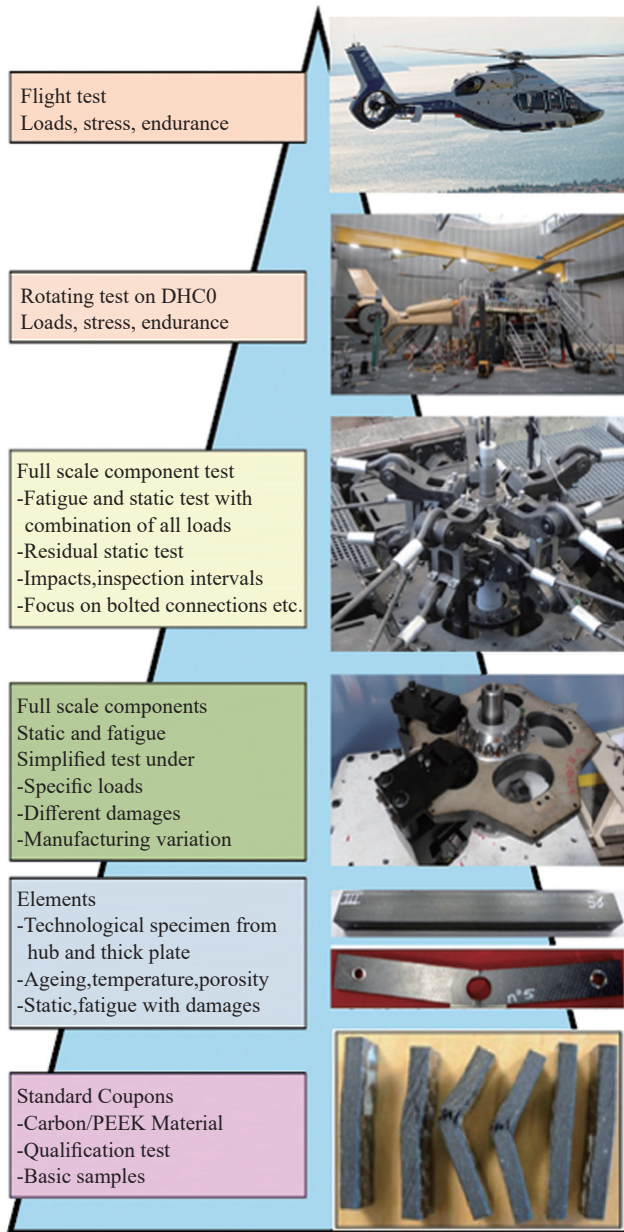


图9 H-160直升机热塑性复合材料桨毂中央件: 积木式适航认证示意图

Fig.9 Thermoplastic composite rotor hub of H-160 helicopter: building block

料力学性能和性能(物理、力学及工艺)稳定性提出了极高要求。在发展高模、高强增强纤维的同时,还需提升树脂基体的韧性、湿热性能及环境适应性能力,代表性新兴技术有热塑性树脂、纳米颗粒改性增韧树脂<sup>[53]</sup>及离散源高精度检测控制<sup>[54-57]</sup>等,这些新技术推动复合材料向高性能化高稳定性方向发展。

### 2.2.2 结构功能一体化

直升机低空低速长时间悬停及对起降跑道无要求的服役环境,将诱发旋翼下洗流产生复合材料结构的砂石低能量冲击问题,因座舱结构顶部旋翼系统的存在而难以设置弹射座椅,将对复合材料结构耐坠性提出要求,而军用直升机在复杂战场环境下,还应具有隐身(声学、红外、雷达和视觉)、防弹、电磁屏蔽等功能。对未来直升机而言,复合材料至少应具备两种或更多功能,代表性新兴技术有一体化保护蒙皮<sup>[58]</sup>、共型天线结构<sup>[59-60]</sup>等,实现复合材料结构承载与功能(隐身、防弹、防雷击、电磁屏蔽、耐坠性等)一体化发展。

### 2.2.3 数字化

航空航天市场优势互补、强强联合的全球产业链逐步形成,直升机产业已经将面向制造和全球化的设计(Design for Manufacturing and Globalization, DMG)方法投入实际运营,其核心设计-制造全球一体化实质上是随计算机和制造技术的进步,采用全新的设计理念 and 手段,发展数字化、自动化的设计技术,将设计和制造在全球化大背景下进一步融为一体,从而加快产品研发进度、提供制造技术在不同国家转移的自由度。代表性新兴技术有工程数字产品定义(Engineering Digital Product Definition, EDPD)和交互式工作指令(Interaction Work Instruction, IWI)等<sup>[61]</sup>,实现直升机复合材料结构设计数字化与制造过程数字化趋向相适应,减少工艺试验次数,降低废品率及提高生产效率。

### 2.2.4 低成本化

航空制造产业的两大主要关注点为重量和成本,复合材料结构因其高比强度带来的减重效益降低了飞机使用方运营成本,但制造成本相比其替代的铝合金却居高不下,因此直升机复合材料全寿命周期内的低成本化是未来的发展趋势,包括材料低成本化、制造低成本化和维护低成本3个方面。代表性新兴技术有非热压罐固化预浸料<sup>[62]</sup>、高置信度虚拟认证方法<sup>[63]</sup>、自动铺丝工艺<sup>[64]</sup>及结构修理标准化等。

### 2.2.5 智能化

变形飞行结构通过调整系统特征使系统状态与操作条件匹配达到提升系统性能的目标,智能复合材料是变形飞机结构低成本简化高效率运行的核心。智能化也是直升机复合材料结构设计需关注的研究方向,开

发复合材料自感知、自诊断、自修复和自适应智能化技术,代表性新兴技术有智能纤维复合材料、自修复树脂等,实现直升机复合材料结构噪声抑制、振动控制、主动变形和性能监测与损伤自修复。

### 3 国内应用现状与差距分析

20世纪80年代,从法国引进的SA365N(直-9)型机,开启了我国直升机复合材料结构大规模应用的先河,结构形式涵盖层板、蜂窝夹层和泡沫夹层,应用部位覆盖旋翼系统、机身蒙皮、整流罩等整机主、次承力结构部件,材料类型包含标准模量碳纤维、高模量碳纤维、高强玻璃纤维、无碱玻璃纤维及芳纶纤维增强环氧树脂基复合材料。

进入20世纪90年代后,在国家多个预研项目支撑和型号牵引下,T300级碳纤维及R级高强玻璃纤维广泛应用,基本满足在役在研型号需求。但基于国内重材料研制轻材料应用的传统认知,附加直升机独有旋翼动部件引发的结构高疲劳特性,新研复合材料应用认证高昂成本及漫长周期的这道“死亡之谷”较难逾越,让材料研制厂商及型号设计师对复合材料研制采用创新望而却步,导致新一代直升机装备复合材料关键技术储备不足。

#### 3.1 应用现状

目前国产直升机结构设计制备大量选用复合材料,主要应用部位有旋翼桨叶和机体结构中尾梁等。复合材料制件主要采用系列化中高温环氧树脂复合材料体系,第二代、第三代韧性树脂与T300级碳纤维、R级高强玻璃纤维及E无碱玻璃纤维已广泛应用,复合材料构件基本为热压罐成型工艺制造。正在开展以3D编织、非热压罐固化及SQRTM等为代表的先进复合材料技术研制应用。

进入21世纪以后,在国家多个预先研究项目的支持下,碳纤维及高强玻璃纤维等此类直升机装备战略性材料基本实现国产化研制应用,实现了直升机国产复合材料从原材料控制到结构设计、工艺制造、无损检测以及试验验证等各方面的统一规范,具备军民用直升机复合材料结构传统积木式鉴定取证所需的试样-元件-组件-部件-系统的试验设计及分析验证能力。

#### 3.2 差距分析

直升机上推广使用复合材料是一项能大幅度改善力学性能、降低生产成本、缩短生产周期和收益颇丰的适用技术,复合材料在结构上的大规模应用主要受限于性能和成本两大因素。从结构设计方的角度来考虑,主要需要研究采用高性能复合材料新技术的同时如何确保型号安全;从结构制造方的角度来考虑,主要关注采

用高性能复合材料新技术的同时不增加成本;从材料研制方的角度来考虑,更应注重高性能复合材料技术研发的需求牵引和推向应用时的技术成熟度。

近十年来,直升机复合材料应用取得了长足进步,但因起步较晚,对比欧美直升机强国尚存在一定差距,主要体现在:已成熟应用的国产复合材料性能稳定性有待提升;关系到复合材料全寿命周期成本的复合材料修理技术成熟度较低;以超薄织物预浸料(固化后单层厚度约0.1mm)和非热压罐成型为代表的结构减重和成本降低效益显著的复合材料材料及成型技术与国外存在技术代差。

高性能复合材料的强各向异性、独特失效机理、受湿热影响及性能变异源多等独特性,为确保型号安全,新研复合材料结构应用积木式试验验证是其显著特点。为削减和缩短复合材料结构应用传统积木式海量试验矩阵所引发的经费成本和认证周期,波音公司针对AH-64D旋翼桨叶大量复合材料验证所发展的嵌套式认证方法已被写入CMH-17G手册,试验量大幅缩减,美国旋翼机工业协会正在针对FVL项目新研复合材料发展高置信度虚拟认证技术<sup>[53]</sup>。国内直升机新研复合材料结构应用尚处于传统积木式认证阶段,是复合材料原材料销售成本居高不下的重要因素,目前正开展嵌套式认证方法应用研究和高效率高精度普适性虚拟认证技术前期理论摸索。

#### 3.3 高性能复合材料技术需求预测

直升机具备向后/侧向飞行、空中悬停及空中定点回转等固定翼飞机所无法完成的机动动作,其在军事及应急救援体系等准军事领域的作用无可替代,未来15~20年内,预测我国将需要至少3000余架各型军用直升机,对于在高性能轻质结构设计领域发挥关键作用的先进聚合物复合材料,将是未来技术发展的聚焦点之一。

根据国外高性能复合材料发展趋势及国内外高性能复合材料差距分析,未来我国直升机高性能复合材料主要技术需求预测如下:以T1100级高强高模碳纤维及高性能热塑性树脂基体等为代表的高性能结构复合材料技术,确保结构重量及寿命效益;以MFC智能纤维等为代表的先进功能复合材料,保障直升机突防攻击能力;以一体化保护蒙皮等为代表的结构功能一体化复合材料,满足直升机高气动效率需求;以非热压罐成型、自动铺丝等为代表的低成本复合材料整体成型技术,实现复合材料构件制造成本降低目标;以3D材料性能参数表征技术、基于真实失效机理损伤演化模型等为代表的复合材料高效率高精度虚拟认证技术,加速新研复合材料在航空结构上的应用转移。

## 4 结论

经过百年发展,直升机在速度、噪声及振动水平控制方面已经取得了长足的技术进步,也在军事、民用领域发挥着越来越重要的作用。这些成就的取得,离不开以高性能复合材料为代表的材料行业做出的卓越贡献。“一代材料、一代装备、技术推动、需求牵引”,未来直升机技术发展离不开材料人的努力和支持,也应该相信,通过直升机平台的需求牵引,未来复合材料技术的发展也势必进入一片新天地。

### 参考文献

- [1] MRAZOVA M. Advanced composite materials of the future in aerospace industry[J]. Incas Bulletin, 2013,5(3):139-150.
- [2] 杨乃宾,章怡宁. 复合材料飞机结构设计[M]. 北京:航空工业出版社,2002.
- [3] YANG Naibin, ZHANG Yining. Aircraft composite structure design[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002.
- [4] 胡和平, 邓景辉. 直升机旋翼桨叶复合材料选材现状与分析[J]. 直升机技术, 2001(1): 1-5.
- [5] HU Heping, DENG Jinghui. Status and analysis of selected composite material for helicopter rotor blade[J]. Technology of Helicopter, 2001(1): 1-5.
- [6] 孟雷,程小全,胡仁伟,等. 直升机旋翼复合材料桨叶结构与选材分析[J]. 高科技纤维与应用, 2014, 39(2): 16-23.
- [7] MENG Lei, CHENG Xiaoquan, HU Renwei, et al. Material selection in helicopter composite blade structure design[J]. Hitech-Fiber and Application, 2014, 39(2): 16-23.
- [8] 黄文俊,何志平,程小全. 直升机复合材料应用现状与发展[J]. 高科技纤维与应用, 2016, 41(5): 7-13.
- [9] HUANG Wenjun, HE Zhiping, CHENG Xiaoquan. Development and application analysis of high modulus glass fiber for helicopter blade[J]. Hitech-Fiber and Application, 2016, 41(5): 7-13.
- [10] 张冰波,郭恩玉,吕本全,等. 复合材料在直升机上的应用[J]. 科技创新与应用, 2013(33): 55.
- [11] ZHANG Bingbo, GUO Enyu, LÜ Benquan, et al. The composite application in helicopter[J]. Technology Innovation and Application, 2013 (33): 55.
- [12] 庄开蓬,李萍. 国外旋翼主动控制技术研究进展[J]. 直升机技术, 2008(1): 59-64.
- [13] ZHUANG Kailian, LI Ping. The state-of-the-art of foreign technologies for active control to helicopter[J]. Technology of Helicopter, 2008(1): 59-64.
- [14] MASSEY S J, KRESHOCK A R, SEKULA M K. Coupled CFD/CSD analysis of an active-twist rotor in a wind tunnel with experimental validation[C]//AHS 71st Annual Forum, Virginia Beach, 2015.
- [15] THORNBURGH R P, KRESHOCK A R. Continuous trailing-edge flaps for primary flight control of a helicopter main rotor[C]//AHS 70th Annual Forum. Montréal, Québec, 2014.
- [16] DAN CA, MALINOWSKI P. Validation of macro fiber composites for strain measurement in structural health monitoring applications of complex aerospace structures[C]//Proceeding of the 9th International Conference on Structural Dynamics, Porto, 2014.
- [17] SIPPEL T. AEC considerations in rotorcraft composites development[C]. Composites in Transportation, Grapevine, 2013.
- [18] WEIMER C. Composites in aerospace-future challenges, needs and opportunities[M]. Toulouse: Airbus Group, 2014.
- [19] GARDINER G. Composites help bell V-280 toward future vertical lift[J]. Composites World, 2016(25): 1-8.
- [20] BESON J M, CELLI M A. H-160 Helicopter:development of a carbon thermoplastic hub[C]//42nd European Rotorcraft Forum, Lille, 2016.
- [21] JOHN M, ZACHARY A. Thermoplastic composite driveshafts for vertical flight: progression to TRL6[C]//AHS 71st Annual Forum, Virginia Beach, 2015.
- [22] KILMAIN C J. Composite application for rotorcraft system housings[C]//AHS 61st Annual Forum, Grapevine, 2005.
- [23] GARHART J. Implementation of carbon fiber composites in rotorcraft transmission housing applications[C]//AHS 61st Annual Forum, Grapevine, 2005.
- [24] REDDY D J. Composites in rotorcraft industry and damage tolerance requirements[C]//Presented at FAA Composites Workshop,Chichago, 2006.
- [25] 杨乃宾,倪先平. 直升机复合材料结构设计[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- [26] YANG Ranbin, NI Xianping. Composite structures design for helicopter[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008.
- [27] NAMPY S N, SMITH E C. Advanced grid-stiffened composite shells for heavy-lift helicopter blade spars[C]//55th AIAA/ASME/ASCE/AHS/SC Structures, Structural Dynamics, And Materials Conference, Maryland, 2014.
- [28] JOUIN P, RICE B P. Materials technologies for a composite helicopter main rotor blade[C]//56th AHS Phoenix, Arizona, 2000.
- [29] BAILEY B. Investigation of a composite hingless helicopter rotor blade with integral actuators[D]. Ottawa: Carleton University, 2000.
- [30] 黄文俊,李满福. 直升机旋翼设计技术应用现状及发展综述[J]. 航空制造技术, 2001, 44(17): 32-35.
- [31] HUANG Wenjun, LI Manfu. Application and development of rotor design technology for helicopter[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2001, 44(17): 32-35.
- [32] LUZETSKY H R, MICHASIOW J. Design development of light weight thermoplastic composite cargo floor for helicopter application[C]//74th AHS Phoenix, Arizona, 2018.
- [33] LUDIN D, RENNIGER M. The development of a floor former concept incorporating energy- absorbing composite tubes[C]//65th AHS. Grapevine, 2009.
- [34] SEN J K, LINDSAY W E. Innovative manufacturing processes for a lightweight, affordable composite helicopter airframe[C]//28th European Rotorcraft Forum, Bristol, 2002.

- [27] THUIS H S J, WIGGENRAAD J F M. Composite landing gear components made with RTM[C]//60th AHS. Grapevine, Texas, 2004.
- [28] DEVIRES H P J. Development of a main landing gear attachment fitting using composite material and resign transfer moulding[R]. Amsterdam: National Aerospace Laboratory, 2011.
- [29] THUIS H G S J. Developments of composite manufacturing technologies at NLR[R]. Amsterdam: National Aerospace Laboratory, 2005.
- [30] THUIS H G S J. The development of composite landing gear components for aerospace applications[R]. Amsterdam: National Aerospace Laboratory, 2004.
- [31] THUIS H G S J. Development of resign transfer moulding technology at NLR[R]. Amsterdam: National Aerospace Laboratory, 2003.
- [32] GOODWORTH A. Rapid parametric design of advanced composite structures on the survivable affordable repairable airframe program[C]//62nd AHS. Phoenix, 2006.
- [33] CARTENSEN T A, GOODWORTH L. Development and validation of a virtual prototype airframe design as part of the survivable affordable repairable airframe program[C]//64th AHS. Montréal, 2008.
- [34] GOODWORTH A, SEN J. Us army-Boeing RWSTD-advanced composite manufacturing for an affordable helicopter fuselage[C]//58th AHS. Montréal, Québec, 2002.
- [35] TORRES M, JONDA W. Eurocopter research in composite fuselage to maintain the production cost below the target[C]//51st AHS. Virginia Beach, 1997.
- [36] Future vertical lift (FVL) capability set #3 request for information(RFI) #2[M]. Maryland: Army Aviation Center of Excellence, 2016.
- [37] HIRSCHBERG M. JMR technology demonstration update: the road to future vertical lift[J]. Vertiflite, 2016, 62(1): 22–27.
- [38] COLUCCI F. Compound Interesting[J]. Vertiflite, 2016, 62(1): 28–30.
- [39] WHITTLE R. Build them and you will learn[J]. Vertiflite, 2016, 62(1): 32–35.
- [40] WHITTLE R. Karem aircraft building new tiltrotor blades[J]. Vertiflite, 2016, 62(1): 36–39.
- [41] COLUCCI F. Scaling up success[J]. Vertiflite, 2016, 62(1): 40–43.
- [42] CHASE N. Joint multi-role technology demonstrator (JMR TD) [C]//JMR TD Pre-Solicitation Conference. Williamsburg, 2012.
- [43] CHASE N. Joint multi-role technology demonstrator (JMR TD) Update[C]//JMR TD Pre-Solicitation Conference. Williamsburg, 2012.
- [44] PETERSON G L, SAHA A B. JMR development[C]//72nd AHS. West Palm Beach, 2016.
- [45] DECKER R, BAINERS A. Affordable design and manufacturing of the V-280 wing[C]//73nd AHS. Fort Worth, 2017.
- [46] PALCIC P X, HE S. The road to first flight: development of the CH-53K drive system[C]//73nd AHS. Fort Worth, 2017.
- [47] GARDINER G. Automating the CH-53K's composite flexbeams[J]. High-Performance Composites, 2014, 22(5): 74–79.
- [48] EMMERLING S, AHCI-EZGI E, BESSON J M. The most recent rules on fatigue and damage tolerance application and challenges at airbus helicopters[C]//73nd AHS. Fort Worth, 2017.
- [49] MAKEEV A, BAKIS C. Advanced composite materials technology for rotorcraft[C]//39th European Rotorcraft Forum. Moscow, 2013.
- [50] HE Y, MAKEEV A, SHONKWILER B. Characterization of nonlinear shear properties for composite materials using digital image correlation and finite element analysis[J]. Composite Science and Technology, 2012,73: 64–71
- [51] SCHILLING P J, KAREDLA B R. X-ray computed microtomography of internal damage in fiber reinforced polymer matrix composites[J]. Composite Science and Technology, 2005, 65(14): 2071–2078.
- [52] NIKSHIKOV Y, AIROLDI L. Measurement of voids in composites by X-ray computed tomography[J]. Composites Science and Technology, 2013, 89: 89–97.
- [53] MCCARTHY D K. Dual-use structures: helicopter empennage antenna prototype[C]//71st AHS. Virginia Beach, 2015.
- [54] TYRRELL S, ROBESON M. Dual-use structures: Composite wing with structural antenna aperture[C]//72nd AHS, West Palm Beach, 2016.
- [55] GRENIER I. Interactive work instructions for Bell 525 relentless[C]//71st AHS. Virginia Beach, 2015.
- [56] QUINLAN E, HUGHES S. Evaluation of laminate quality for out of autoclave manufacturing for a complex shaped crew door[C]//69th AHS. Phoenix, 2013.
- [57] MAKEEV A, SEON G, NIKISHKOV Y. Analysis methods improving confidence in material qualification for laminated composites[C]//72ndAHS. West Palm Beach, 2016.
- [58] CHEN J H, GINGRAS R. Manufacturing of composite helicopter tailboom using AFP process[C]//70th AHS. Montréal, Québec, 2014.
- [59] Engineering Handbook Series for Aircraft Repair. General manual for structural repair[M]. Tinker: The Secretary of the Air Force, 2006.
- [60] THILL C, ETCHES J. Morphing skins[J]. The Aeronautical Journal, 2008, 63(5): 1–23.
- [61] FUSI F. Robust shape optimization of fixed and morphing rotorcraft airfoils[M]. Milan: Politecnico Di Milano, 2015.
- [62] DAVIS O E. “Rotorcraft- back to the future” a discussion of the past, present, and future of rotorcraft[C]//National President of Associazione Arma Aeronautica, The future of Rotary Wing Symposium. Rome, 2012.
- [63] Composite Materials Handbook. Building block approach for composite structures (Vol3)[M]. Wichita: SAE International, 2012.
- [64] RUFFNER D, JOUIN P. Material qualification methodology for a helicopter composite main rotor blade[C]//56th AHS. Virginia, 2000.

通讯作者：陈普会，博士、教授，研究方向为复合材料力学，E-mail：phchen@nuaa.edu.cn。

(责编 古系)