

· 科学论坛 ·

# 复合材料构件制造关键基础科学问题

——第 248 期“双清论坛”学术综述

贾振元<sup>1\*</sup>      赖一楠<sup>2</sup>      王福吉<sup>1\*</sup>      陈明<sup>3</sup>      李迎光<sup>4</sup>      湛利华<sup>5</sup>  
 顾伯洪<sup>6</sup>      徐春广<sup>7</sup>      林莉<sup>8</sup>      段玉岗<sup>9</sup>      叶鑫<sup>2</sup>

1. 大连理工大学 高性能制造研究所, 大连 116023
2. 国家自然科学基金委员会 工程与材料科学部, 北京 100085
3. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240
4. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016
5. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083
6. 东华大学 纺织学院, 上海 201620
7. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081
8. 大连理工大学 无损检测研究所, 大连 116085
9. 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710048

**[摘要]** 基于国家自然科学基金委员会第 248 期“双清论坛”, 本文总结了我国复合材料构件制造研究及产业发展所面临的国家重大需求, 探讨了复合材料构件制造基础与工程应用的研究现状、发展趋势及面临的挑战, 凝炼了该研究领域急需关注和亟待解决的重要基础科学问题, 研讨了今后 5~10 年的科学基金重点资助方向。

**[关键词]** 复合材料构件; 制造技术; 基础研究

先进复合材料具有轻质高强、性能可设计、可整体制造等优势, 甚至还具有隔热、导热、减振、耐高(低)温、耐腐蚀、透波、吸波等特性, 被广泛应用于航空航天、交通运输、能源化工、建筑纺织和体育医疗等领域, 对现代科学技术的发展和高端装备的更新与换代起到了重要的作用, 也是现代低碳经济的核心内容之一, 市场规模逐年增长。据美国 Grand View 研究公司的一份报告显示, 到 2024 年, 预计全球复合材料市场规模将达到 1 308 亿美元。我国复合材料行业经过 40 余年的发展取得了一定的成绩, 产值约占到世界总产值的 25%, 但在规模与水平、设计方法与理念、材料基础与配套、制造工艺与设备等方面仍相对落后于世界先进水平, 亟需尽快找到产业转型与升级的突破口。

复合材料产业的转型与升级离不开复合材料构



**贾振元** 大连理工大学机械工程学院教授, 中国科学院院士。主要从事高端装备高性能零部件控形控性机械加工理论、技术与装备研究, 研发的关联面约束大型曲面构件高性能制造、纤维增强树脂基复合材料高质高效加工等技术在航空航天等重大装备制造中获得重要应用。获国家技术发明奖一等奖、国家技术发明奖二等奖、国家科学技术进步奖一等奖(创新团队)等奖项。



**王福吉** 大连理工大学机械工程学院教授, 国家“万人计划”科技创新领军人才, 辽宁省领军人才。承担国家自然科学基金重点基金项目、国家重点研发计划项目课题等 30 余项, 主要从事连续纤维热塑性树脂基复合材料增材制造、复合材料与金属叠层结构高质高效加工与激光连接等方面的研究, 编写专著和教材各 1 部, 获国家技术发明奖一等奖、国家科学技术进步奖一等奖(创新团队)、辽宁省科学技术进步奖二等奖等奖项。

\* 收稿日期: 2020-02-26; 修回日期: 2021-09-20

\* 通信作者, Email: jzyxy@dlut.edu.cn, wfjll@dlut.edu.cn

件制造技术的突破,特别是构件制造基础理论的创新与发展。复合材料构件的制造过程一般包括预制件赋形、制件成型、构件加工装配等环节,每一环节均能直接影响构件的最终质量和性能,提高各环节制造自动化程度、实现对各环节制造质量的精确控制,是保证复合材料构件高性能制造的关键。但随着复合材料在各领域高端装备中用量的提高,其构件不断向大型化、整体化、复杂化方向发展,对复合材料构件制造技术也提出了新的要求。在此背景下,国家自然科学基金委员会(以下简称“自然科学基金委”)工程与材料科学部、数理科学部和政策局,于 2019 年 11 月 18—19 日联合召开了主题为“复合材料构件制造关键基础科学问题”的第 248 期双清论坛,来自国内机械、材料、力学、化学等多个相关学科领域的 43 位代表参加了此次论坛。与会代表就我国复合材料构件制造中关键基础科学问题与今后重点研究方向进行了认真讨论,分析并凝炼了复合材料构件制造基础研究领域的重大科学问题,提出了今后 5~10 年的重点研究方向。

## 1 复合材料构件制造的现状与发展趋势

### 1.1 面向构件设计性能的复合材料构件形性协同成型原理与技术

复合材料构件的成型过程主要包括赋形、固化两步<sup>[1, 2]</sup>。目前随着复合材料构件向整体化、大型化和复杂化方向发展,对自动赋形技术的需求变得更加迫切。根据预浸料或预制体形态,自动赋形技术可分为自动铺带技术、纤维铺放技术、纤维缠绕技术和三维织造技术。自动铺带技术采用具有一定宽度的预浸带进行铺放,适用于大型平板(如机翼蒙皮)或小曲率曲面的铺放。经过 30 多年的发展,自动铺带技术已发展到第五代,其中重要方向是开发了多铺带头和针对特定机构的专用化铺带机<sup>[3]</sup>。纤维铺放技术采用数量可实时调控的多根窄预浸料丝束进行铺放,适用于曲率复杂曲面的铺放,典型的应用对象为发动机整流罩、进气道等,目前该技术正朝着高速铺放、多铺放头集成铺放、基于工业机器人的平台铺放等方向发展。纤维缠绕技术则是将预浸带连续铺放于旋转的芯模(阳模)上,典型的应用对象为筒状构件、压力容器等。三维织造技术是采用连续纤维束按照一定的规律在三维空间相互交织形成一个整体的纤维网络结构而制成复合材料预制体,贯穿空间各个方向的纤维提高了预制体的整体性和稳定性,尤其提高了材料的层间性能和抗冲击性能,

主要种类包括编织、机织、针织、针刺等立体纺织结构形式,典型应用对象是涡扇发动机叶片、火箭发动机喷管、喉衬、扩张段、以及各类加强筋条<sup>[4-7]</sup>。自动赋形技术在国外起步较早,在材料、工艺装备及工艺控制方面均取得了诸多成果,工程实际上的应用也相对成熟;新一代大型飞机 B787、A350 的翼面均采用自动铺带,机身所有复合材料构件均采用纤维铺放或纤维缠绕;美国的倾斜旋翼 V22“鱼鹰”直升飞机的承力部件主要采用三维织造技术制造。同时,国外对热塑性复合材料构件制造技术也进行积极布局,空客、波音等航空制造商正在开展该技术的材料、工艺及装备的探索,技术成熟度已达 4~6 级。目前,国内针对自动赋形技术的研究仍处于起步阶段,对工艺和装备等技术问题缺乏系统研究。C919、J-20 等重点型号的复合材料构件仍主要采用手工铺放进行制造,自动赋形技术尚未实现大范围、成熟应用,急需开展相关研究。

在复合材料构件固化方面,热压罐固化工艺由于成型质量佳、工艺重复性好、孔隙率低和树脂含量均匀等特点得到广泛应用,目前已成为复合材料构件的主流成型工艺<sup>[8, 9]</sup>。如国外 F-35、A350 和 B787 飞机的复合材料机身和机翼几乎全部采用热压罐固化成型,我国 2018 年 12 月 26 日总装下线的 CR929 复合材料前机身筒段(15 米×6 米)也采用热压罐固化工艺成型。另一方面,近年来涌现了多种新原理固化技术,如电子束固化技术、激光固化技术、微波固化技术等。其中,微波固化技术采用电磁波穿透至纤维增强树脂基复合材料内部,利用材料自身极性分子在高频电场或磁场(2.45 GHz)下产生高频振动(24.5 亿次/秒)、摩擦生热,将微波能转变成热能,从而使复合材料内外同时、快速加热固化成型,是有望替代热压罐固化工艺的潜在技术<sup>[10-12]</sup>。

### 1.2 多材料体系下复合材料构件高质高效加工理论与技术

复合材料一般采用“近净成型”工艺直接制造出复杂结构件,实现材料结构一体化制造,减少装配连接数量,提高制造效率。但是为了实现构件之间的连接装配,对构件进行加工是不可避免的。目前复合材料的加工方式主要涉及钻削、车削、铣削、磨削和特种加工(如水射流、激光加工等)。然而,绝大多数复合材料都是典型的难加工材料,极易产生加工损伤(分层、撕裂等),严重影响构件的服役性能和可靠性,加之高端装备构件结构复杂,损伤容限要求苛刻,使其加工难上加难。可见,实现复合材料构件的

高质高效加工难度大,挑战严峻。

目前,国内外学者在复合材料构件高质高效加工理论与技术方面已开展了系统化的基础研究,其研究内容主要集中在复合材料切削去除机理、复合材料切削力热等物理行为表征、复合材料加工表面质量评价及刀具磨损机理等方面。复合材料切削机理方面,前期研究已表明<sup>[13-15]</sup>;复合材料的切削去除过程与纤维铺层方向密切相关。复合材料非均质对切削加工过程的影响主要体现在刀具交替与增强材料和基体材料互相作用时,纤维和树脂的去除机理相异,极易产生严重的纤维拔出、树脂剥落、表面撕裂等缺陷,进而破坏已加工材料表面质量。复合材料各向异性对切削过程的影响主要表现在随纤维铺层方向而变化的纤维/树脂去除机理。在复合材料切削力热物理行为表征方面,现有研究主要集中在切削参数对复合材料切削力热行为的影响作用,复合材料力热行为理论建模与数值仿真等方面<sup>[16, 17]</sup>。复合材料具有各向异性特性,切削过程中的力热耦合作用极易在已加工表面产生严重的缺陷与损伤。受纤维切削角的影响,复合材料已加工表面质量与纤维铺层角密切相关。目前,国内外学者在复合材料切削表面质量方面的研究主要集中在不同切削条件和铺层方向下复合材料表面形貌表征、表面粗糙度及分层损伤定量评价上<sup>[18]</sup>。在复合材料切削刀具磨损方面,现有研究表明<sup>[19, 20]</sup>;复合材料的刀具磨损机理主要为磨粒磨损和刃口钝化,在某些条件下也可形成月牙洼磨损和粘结磨损,且刀具磨损机理与复合材料的增强相属性密切相关。为实现复合材料构件的高质高效切削加工,近年来国内外学者已开发了以匕首钻、多面钻、三尖钻、套料钻为代表的系列化异型钻头,有效地提高了复合材料结构件的制孔质量。

目前,多材料体系下复合材料构件高质高效加工理论与技术的研究趋势正逐步向力热作用下复合材料去除机理及加工损伤机制、复合材料及其叠层结构加工缺陷精准表征、复合材料构件抗疲劳加工方法与表面完整性主动控制等方面发展。未来研究将重点揭示不同加工环境下,切削热、切削力与加工能量耗散的差异对复合材料的各组成相去除机理和加工损伤机理的影响;应用多维因子分析理论建立复合材料及其叠层结构界面缺陷综合评价体系和界面缺陷与装配工艺的关联模型,形成复合材料及其叠层结构加工界面损伤综合量化评定指标;量化各表面完整性指标对构件疲劳寿命的影响权重,揭示

复合材料加工表面完整性与疲劳性能的映射关联机制。

### 1.3 复合材料制造缺陷的快速精准检测原理与技术

复合材料制造缺陷的准确检测是保证构件服役性能的关键,为了提高制造缺陷定量检测的能力,美国、英国等发达国家大力发展和研究各种成像技术、信号处理技术以及分析计算缺陷的新方法。目前国际上常用的复合材料制造缺陷检测技术是相控阵超声检测技术,如波音 B777X 复合材料机翼翼梁、空客 A400M 和 A350 垂直尾翼或机翼蒙皮等大型复合材料结构均采用相控阵超声进行检测<sup>[21, 22]</sup>。该技术最新的研究进展集中于全矩阵捕捉、合成孔径聚焦、全聚焦成像和相位相干成像等后处理成像技术方面。通过对超声信号进行延迟与叠加后处理,合成出复合材料构件高分辨率聚焦显示图像<sup>[23]</sup>,并针对缺陷信号混叠的问题,提出了自回归谱外推等信号后处理技术,以提高缺陷分辨能力。

现有的相控阵超声检测技术普遍是针对各向同性介质的,在工业检测时常直接将复合材料构件简化为均质各向同性介质或均质各向异性介质。然而,复合材料实际上呈多相层叠结构,构件复杂的几何形状还会导致声学特征复杂多变。忽略层叠结构后无法准确反映复合材料对超声的作用机制,难以作为特征信号准确判读提供指导<sup>[24]</sup>。因此,越来越多的学者开始关注复合材料层叠结构对超声的影响,提出了顾及几何形状、多层结构和弹性各向异性共同作用的声学模型,利用有限元模拟,阐述了超声波的复杂声传播行为<sup>[25]</sup>。

在损伤识别方法方面,传统的模态损伤识别方法实施简单,但对结构的早期损伤敏感性差,目前使用高频导波开展复合材料结构健康监测已成为未来的主流方向<sup>[26]</sup>。然而,导波在复合材料中的传播具有各向异性,多模式混叠且幅值衰减强烈,难以实现大型结构的有效监测。如何有效解决上述问题,是复合材料导波损伤识别和健康监测领域的首要研究方向。同时,导波在早期损伤中的响应非线性,如幅值调制等,使得现有技术仅仅能够依据幅值调制现象做出定性的损伤判断,难以实现定位和定量。因此,非线性导波技术也是未来的主要发展方向之一。

此外,由于均匀性的缺陷本身并不能造成明显的导波回波或能量损失,也难以产生明显的非线性特征,孔隙率等均匀性的缺陷也是导波方法目前难

以检测的。因此,如何针对此类问题提出有效的导波监测方法或指标也是未来的主要研究方向之一。

关于复合材料构件结构健康检测的研究,主要集中于新型传感器研究和传感器布设方案的优化。但面对海量监测数据,如何从中解耦出反映复合材料构件健康状态的信息,缺乏理论模型的指导,无法对数据背后的物理机制做出准确阐释。如何将监测到的应力、温度、振动模态与缺陷信息进行融合,共同对构件的服役安全性做出评判,也缺乏相应的技术手段<sup>[27]</sup>。虽然复合材料的各类结构健康监测技术层出不穷,然而在实际使用过程中却很难找到一种能够兼顾损伤敏感性和鲁棒性的在线监测系统产品。因此,实用的在线监测系统研究开发是本领域未来要做的主要工作之一<sup>[28]</sup>。

#### 1.4 复合材料构件使役性能的准确评估与分析方法

准确评估构件使役性能是机械装备设计和可靠运行的基础工作,机械装备在使用和服役过程中构件的变形和损伤是装备设计的重要问题。金属材料构件使役性能评估与设计目前已有较为完善的理论、方法和标准,从金属材料冶炼、热处理、构件精密制造和后续装配到在各种类型载荷、环境温湿度、电磁场等环境中短、中、长期使役性能,甚至后续循环利用等,已经有了较好的解决方案。

与金属材料构件不同,复合材料构件由于内部结构的多尺度性、力学性质的各向异性和内部缺陷损伤诱发机制的复杂性,在静态和动态加载下的使役性能将呈现更为复杂的特性。复合材料中纤维取向不匀、断裂不同步性和成型制造中所产生空隙、界面缺陷等将显著影响构件在复杂加载工况和极端环境下的使役性能,复合材料构件使役性能评估是多参数多目标函数<sup>[29]</sup>。

可见,相比于金属材料,复合材料使役性能评估除上述个别问题得到部分解决之外,大部分问题还远没有得到重视和研究,这与复合材料未来在重要工程领域巨大的应用潜力极不相称。出现该问题的症结是:(1) 理想条件下制备所得复合材料的使役性能基础数据库积累都不完善,基本物理性质参数因复合材料种类、制造工艺和后续精密加工产生很大变化,非理想条件下制备的复合材料性能则更为发散<sup>[30]</sup>; (2) 由组份材料(纤维、基体等)性质不均匀性和制造过程中所致的材料本身损伤(如纤维断裂)、界面不完善等所导致的先天缺陷,该先天缺陷分布复杂,评估难度极大<sup>[31]</sup>; (3) 复合材料多尺度结

构和非均质结构特征,使得在力场、温度场、湿度场、电磁场等综合作用下,难以准确预测和设计使役性能,尤其是中长期使役性能<sup>[32]</sup>。

随着复合材料构件在航空航天、高速车辆、民用设施中的广泛应用,上述问题需要更进一步突破,形成综合考虑组份材料性质、多尺度结构、多场耦合加载、复杂缺陷分布等因素的准确评估方法体系。预计复合材料构件使役性能的准确评估与分析方法未来将向以下几个方向发展:(1) 复合材料使役性能基础数据库积累;(2) 面向我国大型商业客机制造领域的超混杂复合材料动静态损伤机理;(3) 复合材料构件制造缺陷与使役性能多尺度映射规律,发现缺陷与复合材料构件性质和装备使役性能降解的对应性;(4) 面向复杂外型构件的形性一体化制造,研究三维结构复合材料自动化制造方法、复合材料构件强度多尺度结构设计方法;(5) 基于复合材料微/细观变形与结构演化的非线性本构模型;(6) 极端环境尤其是高温、低温条件下复合材料宏观力学性能与内部微观结构演化关联机制;(7) 面向航天器设计的超高温复合材料强韧化与抗氧化协同机制、模拟真实工况使用条件下复合材料构件使役性能的综合评估指标以及人工智能方法在评估中的应用;(8) 复合材料使役性能的离散性、中长期使役性能与短期使役性能的相关性。通过这些研究方向的突破,将为我国复合材料构件使役性能的准确评估与分析提供科学依据。

#### 1.5 高性能、多功能的新型复合材料增材制造与应用

增材制造技术能够实现复杂结构零件的一体化成形、高精度和高复杂度结构的快速制备等,为复合材料的低成本快速制造提供了可能性。与此同时,随着对功能化、智能化需求的提高,多功能复合材料已成为近几年发展的主流趋势。

对于一种纤维增强复合材料来说,高强度和高韧性通常是相互排斥的,但如果采用两种或多种纤维,依据分布不同、含量不同等得到不同的混合复合材料结构,从而提高或改善复合材料的某些性能。此外,参考自然界中丰富的生物复合材料强韧结构及强韧机制,也为复合材料强韧设计提供思路或设计方法。近年来,通过对传统 3D 打印材料使用短切纤维或连续纤维增强的方式已实现了复合材料的增材制造。增材制造技术在制备一体化、高复杂度结构方面具有技术优势,这为复杂仿生复合材料结构制备提供了可能<sup>[33, 34]</sup>。通过将纤维混杂技术和

仿生复合材料设计与复合材料增材制造技术相结合,可以为强韧复合材料结构设计与制备提供思路与方法,从而进一步拓展复合材料的应用领域。

增材制造技术具有高精度、高柔性的成型特点,也在结构型吸波复合材料设计与制造方面表现出前所未有的优势。例如,利用面投影微立体光固化的方法制造的太赫兹频段三维隐身罩,可以实现在0.3~0.6 THz频段的吸波效果;利用激光选区烧结(SLS)碳基铁粉和尼龙粉末的混合物制备的宽频雷达吸波结构可以实现4~18 GHz频段吸波且反射率小于-10 dB。近年来,吸波复合材料在向着宽吸收与承载一体化的方向发展<sup>[35-37]</sup>,这就要求其不但能够具有优异的雷达吸波性能,还要在不增加质量的同时兼顾承载强度的设计要求。例如,通过将CNT或炭黑与E-玻璃纤维/环氧树脂混合,制备出能够基本覆盖X波段的单层承载隐身结构,同时其拉伸强度也较高。但就目前研究文献的结果来看,采用传统制造方法获得的吸波复合材料很难同时兼顾吸波与承载性能。因此,急需在宏观和微观尺度上对吸波与承载一体化复合材料结构进行设计,利用增材制造复杂结构的技术优势,为最终实现功能材料与承载结构一体化制造提供基础<sup>[38-41]</sup>。

4D打印将可变形材料和3D打印技术相结合,为智能复合材料的设计与制造提供了新方法。可变形材料选择以形状记忆聚合物(SMP)的应用最为广泛。根据现有文献及报道,我国在4D打印技术与SMP研究领域上与国际领先水平的差距并不大。例如,国内研究人员将离子交换聚合金属材料、介电弹性体、SMP等智能材料与4D打印技术结合,制造出了多自由度操作臂;将磁性 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 纳米颗粒作为功能性颗粒添加到聚乳酸(PLA)中,制备出一种可以在磁场的作用下自主展开的螺旋状支架结构,可用于血管支架<sup>[42-45]</sup>。由于4D打印SMP在航空航天、电气自动化、机器人、医疗等行业具有巨大的应用潜力,我国应结合国家重大需求,重点发展智能聚合物复合材料结构设计方法的研究,形成复杂形状复合材料结构的智能制造技术。

综上,复合材料增材制造技术可以实现多材料、多尺度、多功能以及复杂形状复合材料结构制造,使得复合材料可设计性得到最大程度的展现与发挥,在航空航天、国防军事、交通运输、民生产品等领域有着巨大的应用前景。因此,相关领域的研究已经成为下一代高性能与功能复合材料成型制造的必然趋势。

## 2 复合材料构件高性能制造面临的挑战

### 2.1 面向构件设计性能的复合材料构件形性协同成型原理与技术

为满足现代航天航空运载器大型化、高减重和高综合服役性能发展的需要,其主承力构件向大型整体化方向发展,带来了结构特征的复杂化和形性要求的极端化。一方面,为满足减重和高刚度的双重需要,构件多为整体蒙皮与细部加筋组合;另一方面,为了满足高综合服役性能需求,提出了极高的成型精度和性能要求,大于 $10\text{ m}^2$ 的投影面积上需要构件成形后的整体贴膜度小于0.2 mm,关键区域的孔隙率小于1%。复合材料承力构件大型整体化将制造尺度与形/性控制推向极端。

缠绕作为自动化程度较高的热塑性复合材料预制件赋形方法,但其预浸料室温粘附性弱,在赋形过程中需局部升温至软化从而进行粘合。由于高温粘合行为难以调控,在大型复合材料构件的结构特征突变(变厚度、变曲率、跨尺度结构)处极易引发褶皱畸变、纤维皱曲、纤维屈曲、孔隙等缺陷,只得牺牲缠绕速率以保证赋形质量,使得赋形质量与效率难以匹配。

三维织造技术为增强纤维提供了具有空间交织的整体结构,相较于传统层压复合材料,三维织造复合材料具有更好的抗冲击特性、更高的损伤容限和能量吸收率。但随着构件结构尺寸的大型化、复杂化,长路径、窄间隙、多纤维等工艺特点使得纤维低损伤输送、多束纤维自动化同步织造难以实现。同时,多材料同步输送、多参数实时调控、多工艺协同匹配、多机构系统协同等要求加大了织造路径规划和设备控制的难度,限制了织造效率的提高,且预制件的内部结构密度低,导致复合材料浸渍后纤维含量较低(一般约为50%)<sup>[46-49]</sup>。

复合材料的固化过程是一个复杂的热、物理/化学和机械性能急剧变化的过程,且成型过程中形变与性能变化共存。传统热压罐固化成型过程中受热压罐本身热风循环、模具工装系统及其传压方式等制约,构件尺寸大型复杂化导致热力能场时空分布不均匀加剧。对于工艺窗口窄( $50\text{ }^\circ\text{C}$ )、粘度高(热塑性树脂 $>1000\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、热固性 $<1\text{ Pa}\cdot\text{s}$ )、固化温度高( $350\text{ }^\circ\text{C}$ )的热塑性复合材料显得尤为突出。因此,必须提出适用于热塑性复合材料制件精准温压控制、均匀固化的新原理以及热塑性复合材料大型制件高温高压固化新工艺。

## 2.2 多材料体系下复合材料构件高质高效加工理论与技术

相比于传统各向同性金属材料,复合材料在宏观尺度上具有层叠、编织等特征,同时具有显著的非均质性和各向异性。此外,复合材料种类繁多,不同的树脂基体以及不同的铺层结构将直接影响其高效高质切削加工过程。另外,复合材料还常与金属合金组成叠层结构,形成异构接触界面,其切削过程中存在复杂的切削去除机理与表面创成机制。复合材料加工还涉及超声振动、激光等辅助能场加工过程,急需探究不同加工环境下,切削热、切削力与加工能量耗散的差异对复合材料的各组成相去除机理和加工损伤机理的影响。

在复合材料叠层结构加工缺陷精准表征方面,由于叠层结构航空零部件各组成材料的性能差异大,各组成材料之间的接触区物理性能突变,材料去除过程中工件与刀具之间的相互作用关系复杂,切削过程较难控制,这给加工表面形貌表征、缺陷形成机理的理论建模、叠层结构界面缺陷综合评价体系和界面缺陷与装配工艺关联模型的建立带来了巨大挑战。

此外,复合材料具有强度和刚度上的各向异性、内部构造上的不匀性和不连续性等特点,致使其疲劳损伤与破坏机理异常复杂,这给量化各表面完整性指标对复合材料构件疲劳寿命的影响权重,揭示复合材料加工表面完整性与疲劳性能的映射关联机制,主动控制复合材料表面完整性带来了理论与技术上的困难。

## 2.3 复合材料制造缺陷的快速精准检测原理与技术

复合材料构件制造/服役过程中的实时、在线无损检测技术与设备研发,对于及时发现缺陷、有效预警灾难性事故的发生具有重要的现实意义。复合材料组分多样且结构复杂,缺陷形貌随机,作为无损检测信号源的声、光、力、热、电磁等物理场,在复合材料中的传播规律,及其与材料和缺陷之间的作用机制不清。同时,部分复合材料构件尺寸大,几何形状复杂多变,不便于无损检测的进行,难以采集到准确可靠的信号。在传感器种类选择和埋设方案优化设计方面,结构健康状态信息难以准确获取,数据采集和分析系统的实时性不强,面对采集到的海量数据,缺乏有效的分析手段,缺陷特征参量的准确统计分析困难,缺乏科学有效的评判标准,难以对预测结构健康状况做出准确的判断。此外,复合材料的制造

过程可能在各个尺度上产生关联的不确定性,这些不确定性的定量表征、传播,以及对最终产品力学性能的影响对于生产过程的质量控制和结构的安全性评估具有重要意义。

目前,人工操作的检测方式效率低而且检测结果受人员操作水平影响较大,自动化的无损检测技术及设备研发工作亟待开展与技术升级,以保证检测效果连续、稳定,从而更好地适应变曲率、变厚度和变角度区域的高质高效检测的工程需求。

## 2.4 复合材料构件使役性能的准确评估与分析方法

复合材料构件在使用和服役过程中性能的准确评估与分析方法的建立是装备寿命评估和预测的基础,目前我国现有评估与分析技术与国际先进水平仍有差距。首先,在大型商业客机制造领域,拟采用的玻璃纤维增强铝合金层板(Glare)在准静态载荷下的裂纹稳态扩展行为和冲击载荷下的侵彻与贯穿破坏机理尚不明确。其次,在我国航天飞行器热防护材料领域,超高温陶瓷基复合材料、轻质防/隔热一体化材料和超轻质微烧蚀耐热材料的强韧化与抗氧化协同机制复杂不清。此外,金属和金属玻璃基体复合材料非弹性变形(特别是循环变形)和失效行为的细观本构关系模糊,三维结构复合材料大尺寸异型构件冲击和疲劳强度的跨尺度设计与自动化制造技术水平还需继续提高。同时,还需发展基于复合材料真实微结构的原位检测表征与宏观性质预测一体化方法,揭示复合材料构件宏观力学响应与内部微观参量演化的映射规律。最后,从复合材料承力构件的结构复杂性、载荷多样性以及材料制造缺陷、性能各向异性、分散性和环境依赖性出发,分析与评估大构件承载极限。

## 2.5 高性能、多功能的新型复合材料增材制造与应用

增材制造技术在高性能、结构功能一体化复合材料结构设计和制造领域具有广阔前景,同时也面临着多重基础知识难点和技术的挑战。单一纤维增强复合材料在某些性能上相对较弱,强度、韧性不能兼顾,限制了其进一步应用。借鉴自然界高性能强韧生物结构特性,提出复合材料结构仿生设计制造理念,是解决复合材料强而不韧这一共性问题的有效途径之一。但目前面临复合材料结构仿生设计存在多种强韧生物结构协同作用机理不清,强韧一体化仿生设计理论、方法缺失,多种纤维混杂下的复杂仿生结构的形、性可控制造难等科学与技术挑战。

需进一步加强强韧复合材料仿生机理—设计—制造关联研究,以形成完整的复合材料技术体系,实现高性能强韧复合材料构件制造。现阶段结构功能一体化复合材料的材料体系、制备工艺、微结构设计、力学/吸波性能协同作用与映射关系尚需进一步明确,介电与结构功能一体化复合材料的设计理论和制造方法有待于进一步发展,以支撑我国未来无线通讯技术和航空器隐身技术的突破发展。

### 3 未来主要的研究方向与科学问题

#### 3.1 面向构件设计性能的复合材料构件形性协同成型原理与技术

赋形高温压作用下纤维形态演变机制与精准调控。非可展曲面的纤维铺放路径规划;适应复合材料自动化成型的基体树脂研发;力热共同作用下树脂流动特性和预浸料粘合机理;纤维形态和树脂状态交互影响机制;预制件内部粘合状态空间分布规律。

预制件低损伤同步赋形方法与多机构系统协同机理。构建多材料、多结构大型预制件结构赋形过程的精确仿真方法;探究纤维低损伤同步输送、多束纤维自动化织造工艺方法;研制大型、高效、自动化复合材料构件数字化成形智能装备;开发集成CAD/CAM进行赋形动作自动规划和控制的先进技术体系。

大型复合材料构件固化形性演变和缺陷/变形预测。研究固化多能场作用下构件缺陷/变形规律,揭示复合材料构件固化的形性演变机制;研究复合材料构件细观—介观—宏观缺陷及应力演变规律的内在联系,建立工艺参数—固化应力—缺陷/变形的精细化模型,形成大型复合材料构件固化缺陷/变形高精度预测方法。

大型复合材料构件固化在线监测与形性协同调控方法。研究固化过程中热/力演变行为的在线监测方法,提出大型复合材料承力构件固化过程多能场形性协同调控原理;开发面向构件设计性能的大型构件形性协同调控平台,形成大型复合材料构件高效形性协同成型新方法。

#### 3.2 多材料体系下复合材料构件高质高效加工理论与技术

力热作用下复合材料去除机理及加工损伤机制。研究多材料体系下复合材料切削加工多界面力热传递与耦合作用机制;探究多尺度切削过程中复合材料纤维/树脂脆性断裂与表面创成机制;建立基

于力热耦合的多材料体系下复合材料热损伤及性能退化物理模型。

复合材料及其叠层结构加工缺陷精准表征。研究多场耦合下复合材料叠层结构切削力热损伤特性的声学表征;提出微观力学特性退化的复合材料加工缺陷区域精准检测方法;建立基于力热耦合作用的复合材料切削损伤物理预测模型和基于使役性能综合影响作用的复合材料切削缺陷精准评价方法。

复合材料构件抗疲劳加工方法与表面完整性主动控制。研究复合材料表面微观形貌结构与其构件抗疲劳性能的物理映射机制;提出基于复合材料构件形位精度与表面质量主动控制的工艺优化方法;研究基于形性协同设计及缺陷主动抑制的高性能刀具设计与开发方法。

#### 3.3 复合材料制造缺陷和损伤的精确表征和高效检测

复合材料复杂缺陷及损伤的多尺度表征原理和方法。研究复合材料孔隙、分层、撕裂等典型缺陷和损伤的多尺度和不确定性特征;研究制造加工过程中复合材料缺陷和损伤演变特征的原位观测技术;搭建不同复合材料体系、不同制造工艺下的复合材料缺陷和损伤数据库。

复合材料近真实建模仿真及能量场作用机制。建立虑及多相、叠层、弹性各向异性及曲率变化等特征的多尺度复合材料及结构模型;研究声、光、热、电磁等能量场在含缺陷复合材料构件中的传播规律;研究能量场在复合材料宏观及微观多相多尺度界面的能量传递机制。

复合材料多因素耦合缺陷特征信息精确解耦原理和方法。研究复合材料无损检测高精度高可靠性信号采集和信号增强技术;研究多因素耦合条件下复合材料缺陷和损伤解耦原理和特征信息提取方法;研究大型复合材料构件缺陷和损伤的自动化高效无损检测原理和方法。

#### 3.4 复合材料构件使役性能的准确评估与分析方法

复合材料使役性能基础数据库建设和标准化设计。建设在各种使役工况下复合材料及其构件性能的基础数据库,建立与金属材料机械结构设计类似的基础规范和标准。

复合材料构件使役性能的复合材料内部缺陷相关性。研究复合材料预制件制造中纤维和织物损伤分布与强度变化机制;研究复合材料多尺度结构与缺陷产生的关系;研究复合材料构件机械加工和装

配中的损伤产生机制;研究复合材料在准静态和冲击加载下裂纹扩展机理;研究复合材料成型过程中界面缺陷与分布规律。

复合材料中长期服役条件下和多场耦合条件下的强度设计。研究基于复合材料细观结构和极端环境下的本构关系;研究在高温环境中复合材料服役性能与强韧化设计;研究多场耦合加载下复合材料构件的可靠性;中长期循环加载下构件的剩余强度和强韧化设计。

### 3.5 高性能、多功能的新型复合材料增材制造与应用

高性能仿生复合材料结构与增材制造技术。开展自然界高性能强韧生物结构特征研究;生物结构多材料、多尺度协同强韧机理研究;强韧仿生复合材料结构设计理论与方法研究;多材质、多尺度仿生强韧结构的形、性可控增材制造技术研究。

承载与吸波功能一体化复合材料的设计理论和制造方法。包括:多材料、多尺度结构的电磁/承载功能耦合机制与调控;吸波/承载复合材料的多尺度设计理论与方法;吸波/承载复合材料构件的形、性可控增材制造技术。

智能聚合物复合材料结构的设计方法。包括:复合材料性能跨尺度界面传递与调控机制;智能复合材料结构中材料、结构制造与宏观性能映射关系;智能复合材料结构与功能一体化增材制造技术。

## 4 结 语

复合材料构件的高性能制造是支撑高端装备自主研发,促进航空航天、地面交通、绿色能源等装备制造重点领域转型升级,引领先进制造及其相关学科创新发展的战略致胜点。我国复合材料产业面临着原材料强度低、大型构件制造坏品率高、自动化进程慢等瓶颈问题,导致复合材料构件的生产效率和质量难以满足行业论证需求,而这些问题的解决主要依赖于构件制造技术的进步。我国复合材料构件制造技术起步较晚,但现在正面临百年未有之大变革时期,高端技术急需升级、革新和突破,未来 5~10 年应建立多学科融合的科研联合体,集中攻关复合材料构件成型、加工及缺陷检测与性能评估等方面的基础研究,为复合材料构件制造技术服务,拓展制造科学理论。未来我国复合材料构件的制造技术有望实现“跟跑”、“并跑”到“领跑”的重大跨越,这将进一步提升我国经济与军事实力,对提升我国的国际地位和话语权具有重大意义。

## 参 考 文 献

- [1] Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction. *Progress in Aerospace Sciences*, 2005, 41(2): 143—151.
- [2] 杜善义. 先进复合材料与航空航天. *复合材料学报*, 2007, 24(1): 1—12.
- [3] 宋清华, 肖军, 文立伟, 等. 热塑性复合材料自动纤维铺放装备技术. *复合材料学报*, 2016, 33(6): 1214—1222.
- [4] Saboktakin A. 3D textile preforms and composites for aircraft structures: a review. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 2019, 6(1): 2.
- [5] Elagamy N, Laliberte J. Historical development of geometrical modelling of textiles reinforcements for polymer composites: a review. *Journal of Industrial Textiles*, 2016, 45(4): 556—584.
- [6] Zhang DT, Song LL, Chen L, et al. Three-dimensional needle-punching for composites—a review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 85: 12—30.
- [7] 陈利, 赵世博, 王心森. 三维纺织增强材料及其在航空航天领域的应用. *纺织导报*, 2018(S1): 80—87.
- [8] Muric-Nesic J, Compston P, Stachurski ZH. On the void reduction mechanisms in vibration assisted consolidation of fibre reinforced polymer composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(3): 320—327.
- [9] Yang X, Zhan L, Jiang C, et al. Effect of random vibration processing on void content in composite laminates. *Polymer Composites*, 2019, 40(8): 3122—3130.
- [10] Joshi SC, Bhudolia SK. Microwave-thermal technique for energy and time efficient curing of carbon fiber reinforced polymer prepreg composites. *Journal of Composite Materials*, 2014, 48(24): 3035—3048.
- [11] Zhou J, Li YG, Li NY, et al. A multi-pattern compensation method to ensure even temperature in composite materials during microwave curing process. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, 2018, 107: 10—20.
- [12] Guan CL, Zhan LH, Liu GM, et al. Optimization of a high-pressure microwave curing process for T800/X850 carbon fiber-reinforced plastic. *High Performance Polymers*, 2020, 32(1): 30—38.
- [13] Arola D, Ramulu M, Wang DH. Chip formation in orthogonal trimming of graphite/epoxy composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1996, 27(2): 121—133.



- [14] Wang DH, Ramulu M, Arola D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: Unidirectional laminate. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1995, 35(12): 1623—1638.
- [15] Li H, Qin X, He G, et al. An energy based force prediction method for UD-CFRP orthogonal machining. *Composite Structures*, 2017, 159: 34—43.
- [16] Mkaddem A, El Mansori M. Finite element analysis when machining UGF-reinforced PMCs plates: chip formation, crack propagation and induced-damage. *Materials and Design*, 2009, 30 (8): 3295—3302.
- [17] Feito N, López-Puente J, Santiuste C, et al. Numerical prediction of delamination in CFRP drilling. *Composite Structures*, 2014, 108: 677—683.
- [18] Che D, Saxena I, Han P, et al. Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: a literature review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME*, 2014, 136(3): 034001.
- [19] Rawat S, Attia H. Wear mechanisms and tool life management of WC-Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites. *Wear*, 2009, 267 (5—8): 1022—1030.
- [20] Wang X, Kwon PY, Sturtevant C, et al. Tool wear of coated drills in drilling CFRP. *Journal of Manufacturing Processes*, 2013, 15 (1): 127—135.
- [21] Georgeson G. A century of Boeing innovation in NDE. *Boeing technical Journal*, 2016: 1—11.
- [22] Bullinger O, Schnars U, Schulting D, et al. Laminographic inspection of large carbon fibre composite aircraft-structures at Airbus. 19th World Conference on Non-Destructive Testing. Munich, Germany: 2016: 1—10.
- [23] Lin L, Cao H, Luo Z. Dijkstra's algorithm-based ray tracing method for total focusing method imaging of CFRP laminates. *Composite Structures*, 2019, 215: 298—304.
- [24] 罗忠兵, 曹欢庆, 林莉. 航空复材构件 R 区相控阵超声检测研究进展. *航空制造技术*, 2019, 62(14): 67—75.
- [25] Lin L, Cao H, Luo Z. Total focusing method imaging of multidirectional CFRP laminate with model-based time delay correction. *NDT & E International*, 2018, 97: 51—58.
- [26] 王奕首, 卿新林. 复合材料连接结构健康监测技术研究进展. *复合材料学报*, 2016, 33(1): 1—16.
- [27] 冯勇明. 基于 Lamb 波的航空复合材料板结构损伤识别技术方法研究. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [28] 陈雪峰, 杨志勃, 田绍华, 等. 复合材料结构损伤识别与健康监测展望. *振动、测试与诊断*, 2018, 38(1): 1—10.
- [29] Chacón JM, Caminero MA, Núñez PJ, et al. Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 2019, 181: 107688.
- [30] Sudhir A, Talreja R. Simulation of manufacturing induced fiber clustering and matrix voids and their effect on transverse crack formation in unidirectional composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 127: 105620.
- [31] Caminero MA, García-Moreno I, Rodríguez GP, et al. Internal damage evaluation of composite structures using phased array ultrasonic technique: Impact damage assessment in CFRP and 3D printed reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 165: 131—142.
- [32] Xu H, Pei Y, Li F, et al. A multi-scale and multi-field coupling nonlinear constitutive theory for the layered magnetoelectric composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2018, 114: 143—157.
- [33] Kabir SMF, Mathur K, Seyam AFM. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: history, mechanism, materials and properties. *Composite Structures*, 2019: 111476.
- [34] Blok LG, Longana ML, Yu H, et al. An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 176—186.
- [35] Jahangir MN, Billah KMM, Lin Y, et al. Reinforcement of material extrusion 3D printed polycarbonate using continuous carbon fiber. *Additive Manufacturing*, 2019, 28: 354—364.
- [36] van de Werken N, Hurley J, Khanbolouki P, et al. Design considerations and modeling of fiber reinforced 3D printed parts. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 160: 684—692.
- [37] Tang B, Zhu Y, Zhou X, et al. Wide-angle polarization-independent broadband absorbers based on concentric multisplit ring arrays. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(6): 1—7.
- [38] Wu LL, Tian XY, Yin M, et al. Three-dimensional liquid flattened Luneburg lens with ultra-wide viewing angle and frequency band. *Applied Physics Letters*, 2013, 103 (8): 084102.
- [39] Ming Y, Xiao YT, Wu LL, et al. All-dielectric three-dimensional broadband Eaton lens with large refractive index range. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(9): 094101.
- [40] Shin D, Urzhumov Y, Lim D, et al. A versatile smart transformation optics device with auxetic elasto-electromagnetic metamaterials. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4084.

- [41] Jiang H, Ren Y, Liu Z, et al. Low-velocity impact resistance behaviors of bio-inspired helicoidal composite laminates with non-linear rotation angle based layups. *Composite Structures*, 2019, 214: 463—475.
- [42] Libonati F, Gu GX, Qin Z, et al. Bone-inspired materials by design: toughness amplification observed using 3D printing and testing?. *Advanced Engineering Materials*, 2016, 18 (8): 1354—1363.
- [43] Nemat-Nasser S, Kang WJ, Mcgee JD, et al. Experimental investigation of energy-absorption characteristics of components of sandwich structures. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(6): 1119—1146.
- [44] Djumas L, Molotnikov A, Simon GP, et al. Enhanced mechanical performance of Bio-inspired hybrid structures utilising topological interlocking geometry. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26706.
- [45] Chen J, He C, Gu C, et al. Compressive and flexural properties of biomimetic integrated honeycomb plates. *Materials & Design*, 2014, 64: 214—220.
- [46] 胡培利, 单忠德, 刘云志, 等. 复合材料构件预制体压实致密工艺研究. *机械工程学报*, 2019, 55(9): 191—197.
- [47] 庞生洋, 胡成龙, 杨鹭, 等. 预制体结构对 C/C 复合材料力学性能、断裂行为以及热物性能的影响. *机械工程学报*, 2018, 54(9): 97—107.
- [48] Beier U, Fischer F, Sandler JKW, et al. Mechanical performance of carbon fibre-reinforced composites based on stitched preforms. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(7): 1655—1663.
- [49] 王静. 三维机织热塑性复合材料新工艺的开发. *玻璃钢/复合材料*, 2005(5): 37—40, 19.

### Key Basic Scientific Questions in Composite Material Parts Manufacturing: An Academic Review of the 248<sup>th</sup> Shuangqing Forum

Jia Zhenyuan<sup>1\*</sup>    Lai Yinan<sup>2</sup>    Wang Fujl<sup>1\*</sup>    Chen Ming<sup>3</sup>    Li Yingguang<sup>4</sup>    Zhan Lihua<sup>5</sup>  
Gu Bohong<sup>6</sup>    Xu Chunguang<sup>7</sup>    Lin Li<sup>8</sup>    Duan Yugang<sup>9</sup>    Ye Xin<sup>2</sup>

1. *Institute of High Performance Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116023*
2. *Department of Engineering and Material Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*
3. *School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240*
4. *School of Mechatronics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016*
5. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083*
6. *College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620*
7. *School of Machinery and Vehicles, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*
8. *Institute of Nondestructive Testing, Dalian University of Technology, Dalian 116085*
9. *School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710048*

**Abstract** This review summarizes the major national demands for the research and industrial development of composite material parts manufacturing in China based on the presentations and discussions at the 248<sup>th</sup> Shuangqing Forum of National Natural Science Foundation of China. The current research statuses, the developing trends, and the existing challenges are deliberated within the fundamental research and industrial applications in the composite material parts manufacturing field. Subsequently, this review refines the key basic scientific questions in this field that urgently need to be focused on and solved and elaborates the funding strategies in the next 5 to 10 years.

**Keywords** composite component; manufacturing technology; fundamental research

(责任编辑 张强)

\* Corresponding Author, Email: jzyxy@dlut.edu.cn, wfjsll@dlut.edu.cn