DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.07.008

复合材料构件设计理论及仿真研究进展

陶然[1]，贺春旺[1]，罗俊荣[1]，毛贻齐[2]，马连华[3]

（1. 北京理工大学先进结构技术研究院，北京 100081；2. 湖南大学机械与运载工程学院，长沙 410082；
3. 河北大学建筑工程学院，河北保定 071002）

摘要：复合材料构件设计及仿真是复合材料性能与应用研究的重要组成部分，在复合材料产业国际竞争中发挥着关键作用；我国在此领域的系统性研究起步较晚，理论水平滞后、自主标准受制、仿真软件基础薄弱、设计与制造分离等诸多风险共存，相比支撑复合材料构件在重要装备上大规模、高水平应用的长远目标差距明显。本文针对复合材料构件在重要装备应用方面的难题与挑战，剖析了复合材料构件设计理论及仿真的共性需求，梳理了国内外发展现状与主要趋势，提出了我国复合材料构件设计理论及仿真的重点方向：极端和多场环境下复合材料构件的设计理论、复合材料构件动力学分析与设计理论、数据驱动的复合材料构件仿真方法、复合材料构件强度与寿命仿真评价方法。为此建议，开展面向装备工程应用的复合材料构件多场多尺度设计技术、动载荷下的复合材料构件性能设计技术、数据驱动的复合材料构件设计与仿真技术、复合材料构件强度与寿命仿真软件平台等研究，全面提升我国复合材料构件的设计及工程应用水平。

关键词：复合材料构件；多场多尺度设计；动力学设计；数据驱动；强度与寿命评价

中图分类号：TB332　　**文献标识码：**A

Research Progress of Design Theory and Simulation of Composite Components

Tao Ran[1], He Chunwang[1], Luo Junrong[1], Mao Yiqi[2], Ma Lianhua[3]

(1. Institute of Advanced Structure Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. College of Civil Engineering and Architecture, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China)

Abstract: The design and simulation methods of composite components are vital to the performance and application research of composite materials. Research pertaining to composite component design and simulation systems begins late in China and confronts many risks，including inadequate theoretical levels，lack of independent standards，weak foundation of simulation software，and segregation between design and manufacture. Therefore，the large-scale application of composite components in major equipment can hardly be realized. Considering the problems and challenges，this study analyzes the macro demand for composite component design theory and simulation technique，summarizes the development status and main trends in China and abroad，and proposes the key directions in China：design theory of composite components under extreme and multi-field environment，dynamic analysis and design theory of composite components，data-driven simulation method of composite components，and simulation evaluation method of strength and life of composite components. We suggest that research should be conducted on multi-field and multi-scale design

收稿日期：2022-03-14；**修回日期：**2022-10-09

通讯作者：陶然，北京理工大学先进结构技术研究院副教授，研究方向为轻量化多功能复合材料结构设计制备与评价；
E-mail: taoran@bit.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“面向2035的复合材料构件精确制造发展战略研究”(2021-XZ-26)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

technology of composite components for equipment engineering applications，performance design technology of composite components under dynamic load，data-driven design and simulation technology of composite components，and strength and lifespan simulation software platform of composite components，thereby comprehensively improving the design and engineering application level of composite components in China.

Keywords: composite material components; multi-field and multi-scale design; dynamic design; data-driven simulation; evaluation of strength and lifespan

一、前言

航空、航天、航海等领域的重大装备发展迅速，服役环境更为恶劣，这对复合材料构件的性能与功能提出了严峻挑战。满足超轻量化、超高承载、极端耐热、高可靠性等指标，实现隐身、透波、抗爆、防火、减隔振等多种功能集成，需要在复合材料构件设计理论及仿真方法层面取得突破，相关内容成为国内外复合材料研究的关注重点。例如，美国空军实验室、剑桥大学等，建立了多功能复合材料构件优化设计与仿真方法、多参数多目标协同优化算法，设计了集承载、防热、隐身特性于一体的新型高性能复合材料构件，实现了高超声速飞行器、新型舰船等装备应用；我国的高校和科研院所在复合材料多尺度/多场耦合优化设计理论、数据驱动优化方法等方面也取得了良好进展。

值得指出的是，发掘复合材料构件的性能与功能潜力，突破现有设计与应用极限，依然是主要趋势；国内研究机构因起步晚、起点低，在复合材料构件设计理论与仿真方面相比国际先进水平仍存在不小差距。相关差距体现在四方面：① 复合材料构件多场多尺度设计理论与优化能力未能完全建成，装备构件的轻量化、多功能集成水平受限；② 有关复合材料构件动力学设计的理论认识不清，导致复杂构件真实服役预测难，性能与设计偏差大；③ 复合材料构件的数据驱动仿真方法依然缺乏，从材料多尺度模拟到结构多尺度模拟均有待实现，制约了大型复合材料结构的性能设计及预测；④ 复合材料构件强度与寿命仿真评价方法基础薄弱，真实与虚拟实验结合的构件性能与功能评价方法尚属空白。

目前，我国在复合材料构件设计理论及仿真的研究现状梳理不清，未来重点发展方向未有系统性探讨。本文立足复合材料构件应用快速增长的工程实践，从背景与需求、现状与趋势、重点发展方向等方面系统梳理复合材料构件设计理论与仿真研究进展，突出多场多尺度、动力学、数据驱动、强度与寿命等设计理论及仿真重点，据此提出未来研究建议，以期为复合材料构件的研究布局、研制应用等提供参考与启示。

二、复合材料构件设计的背景与需求

（一）复合材料构件的多场多尺度设计理论

先进装备对复合材料构件服役环境提出了严苛要求[1]，如在高温氧化、化学腐蚀、电磁辐射等极端和复杂环境下，复合材料构件会出现强烈的多物理场耦合行为，其变形、损伤、破坏是多种机理相互影响与耦合作用的结果。在航空、航天、深空、深海、医工交叉等领域，很多复合材料构件服役于复杂的多场环境中，涉及力学、化学、光学、电磁等多物理场的耦合作用。例如，高温环境下的复合材料构件涉及力学与化学（如氧化、腐蚀、烧蚀等）耦合，不仅存在溶质组分的扩散、聚集等物理过程，还伴随着氧化反应等化学过程，表现出非平衡、非稳态、多介质、强非线性、强耦合的复杂特征。对于多场环境下服役的复合材料构件，单纯以力学量（应力、应变、变形能等）为基础的传统设计理论及失效准则不再适用，亟需发展多场耦合的新型设计理论和仿真评估体系。

复合材料构件在细观尺度单元中包含大量的纤维，若采用考虑基体、纤维所有微观特征的设计及计算方法，对大尺度复合材料而言计算成本是难以负担的。为了同时刻画复合材料构件宏观与细观尺度的多场耦合变形、损伤、破坏等行为，可行的方式是采用多尺度方法，即分别在宏观、细观尺度上开展多场耦合设计及计算，同时建立多尺度之间的联系，相关方法在复合材料热–力耦合，磁–电–力耦合等方面获得初步应用[2]。多场耦合环境下复合材料构件的变形分析方法、损伤失效机理、服役安全及耐久性多尺度设计，是重大装备发展过程中亟待解决的关键科学问题[3]。因此，发展多物理场耦合条件下复合材料–结构一体化多尺度设计理论

体系，是重要且具有挑战性的科学任务。

（二）复合材料构件动力学设计理论及仿真方法

爆炸、冲击、振动等动态服役环境，对复合材料构件动力学设计理论与仿真方法提出了严峻挑战[4]。基于现有的纤维树脂基复合材料体系，从材料固有属性出发，突破材料结构一体化设计极限，发展真正面向实际动态服役工况，具备抗爆、抗冲击、减隔振性能的复合材料构件动力学设计与仿真体系，是高性能复合材料构件在未来装备上的应用趋势。

复合材料研究与应用强国在复合材料结构抗冲击、抗爆炸性能方面已有数十年的基础和经验，建立了比较系统的复合材料构件动力学设计与仿真体系；在此基础上拓展形成了完整的复合材料抗爆、抗冲击、减隔振动力学设计及仿真标准。相比之下，国内存在的差距表现在：① 有关复合材料构件结构在动态载荷下的损伤演化规律认识不清，无法准确预报结构性能；② 针对复合材料构件结构抗爆、抗冲击、减隔振等动态响应的设计理论与仿真平台缺乏，无法充分发挥复合材料构件在动态载荷下应有的性能与特征优势。因此，发展复合材料构件动力学设计理论及仿真方法是需求迫切且具挑战性的科学任务。

（三）复合材料构件的数据驱动仿真方法

先进装备对高性能复合材料构件的需求快速增长，但现有设计与仿真方法难以实现显著缩短以下方面的时间周期：复合材料构件设计研发、大型复合材料构件大批量虚拟实验、复合材料构件多尺度力学行为表征。在基于经典范式的单机串行求解体系下，复合材料构件的大规模复杂力学行为计算仿真效率提升空间已逼近极限。随着数据科学领域中人工智能（AI）的快速发展，复合材料构件仿真方法的研究范式已经出现根本性的变化；在实验、理论、计算的经典范式发展趋于成熟后，数据科学成为科学研究的第四范式[5]。以数据驱动、AI、数字孪生为代表的大数据科学手段，可显著降低智力消耗与时间成本，为复合材料构件的高效研发与快速评估提供了新思路。发展以高质量数据库、高效率数据驱动算法为核心的仿真方法，正当其时。

复合材料构件在不同尺度上具有不同的材料特征，复杂承载条件下构件的损伤与破坏也具有多尺度特征。传统的唯象方法只能表征宏观尺度下的平均性能，无法准确刻画细观及微观尺度下的力学行为；传统的计算方法停留于代表性体积单胞的求解层面，只能得到细观或微观尺度上的力学响应，而无法与复合材料构件的宏观性能进行关联；传统的唯象本构及计算方法，难以精确且高效地预测复合材料构件的力学性能。多尺度分析方法可有效捕捉复合材料构件的宏–细观力学行为，但面临计算效率偏低、求解自由度过大等困难。因此，亟需引入数据科学领域的数据驱动算法，拓展与经典力学方法相融合的多种计算仿真模式；建立复合材料构件的高性能计算分析平台，提供从材料设计、制备到结构性能评估的复合材料构件全产业链支撑能力。

（四）复合材料构件强度与寿命仿真评价方法

工业与制造业快速发展，航空、航天、风力发电、轨道交通、汽车、高压容器等行业对先进复合材料构件的需求稳步增长。在此背景下，追求发展结构质量轻、强度/刚度大的复合材料构件，才能适应工程应用、发挥材料效率[6]。例如，复合材料构件广泛用于宽体客机中的前机身段、机翼、中机身段、中央翼盒等部位，实现了减重20%~25%的工程目标[7]；国产高速磁浮列车上采用了复合材料制造的车体、司机室、悬浮架，较铝合金方案减重30%以上，寿命延长5年以上，综合性能满足整车的强度、撞击、振动等要求。然而，复合材料构件的物理检测面临着尺寸极大、构造异型、测试方法难以标准化、实验成本高、测试周期长等问题，不仅需要大型测试设备、设计复杂的实验工装，而且获得的变形、疲劳寿命等数据往往数量有限。因此，结合实验测试、数值仿真、AI驱动等手段，突破静载、动载、复杂环境条件下复合材料构件强度与寿命仿真评价技术，是保障重大工程、高端装备服役安全性的必要举措。

三、复合材料构件设计理论及仿真的研究现状与趋势

（一）复合材料构件多场多尺度设计理论

复合材料构件在高温、氧化等复杂环境下的多物理场耦合变形、损伤与破坏行为研究以及对应的多尺度计算等，引起了国内外研究者的广泛关注。

复合材料构件的热氧化过程涉及“热、力、化”高度耦合，从多尺度角度对热–力–化耦合行为进行设计分析与仿真，是具有挑战性的研究课题。

前期研究多是通过加速热氧老化实验来开展复材构件的力学性能退化与寿命预测，利用阿伦尼乌斯定律来预估材料后期的力学性能；一定程度上体现了反应/扩散与力学的弱耦合（即考虑了化学场、热场对力学的影响），但未考虑力学变形对热反应、化学扩散的影响，实际上没有建立复合材料构件的多场耦合理论。针对超高温复合材料构件，建立了考虑塑性和蠕变的相场氧化模型，研究了初始粗糙表面、孔洞缺陷对氧化过程中力学行为的影响[8]；基于热力学框架建立了一种考虑质量扩散、氧化反应、黏弹性有限变形耦合连续介质模型，研究了SiC纤维在超高温氧化过程中表面裂纹的形成机理；建立了化–力耦合的本构理论，据此预测热氧化复合材料的本构响应[9]。在此基础上，提出了具有热力学一致性的化–力耦合大变形理论，考虑了氧扩散、化学反应与力学的耦合作用，完成聚合物热氧化与力学耦合变形行为数值模拟[10]；进一步地，将这种化–力本构模型推广到纤维增强聚合物复合材料，对热氧化、力学行为进行了数值模拟[11]；提出了热–化–力耦合的黏塑性理论模型，应用于金属的力–氧化耦合问题研究[12]。针对航空发动机用钛/环氧树脂/钛胶合接头，采用热–化–力模型研究了热氧化引起的应力状态与梯度，发现热氧化梯度对接头内部应力具有重要影响[13]。

针对复合材料在多场耦合条件下的变形和损伤演化问题，主流方式是建立包括基体和纤维束在内的细观代表性体积单元有限元模型，基于聚合物氧化前后的力学实验数据，引入基体的本构关系以及纤维/基体的内聚力模型，对编织复合材料在不同热氧化条件下的变形、损伤过程进行数值计算[14–16]。这些有限元模型不是基于化学反应动力学所建，无法反映力学对化学场的影响。聚合物氧化反应受到多种因素的影响，需在高分子水平对其化学反应动力学机理进行深入理解，才能将化学效应与力学变形耦合并据此开展复合材料变形、损伤演化机制研究。

当前，多尺度复合材料构件热–化–力多场耦合设计理论与仿真方法还有很大发展空间，如聚合物基复合材料化–力耦合理论模型仅考虑了聚合物的弹性变形，而实际热氧化的编织复合材料由于基体的收缩会产生微裂纹损伤[14,17]，同时力学响应表现出明显的塑性变形特征。建立考虑聚合物塑性变形、损伤演化的化–力耦合本构理论，具有重要的工程应用价值。

（二）复合材料构件动力学设计理论

复合材料构件设计理论与仿真方法研究逐渐从准静态响应过渡到动态响应以及可变构型层面。较多工作集中在建立冲击和疲劳载荷下复合材料构件强度理论、损伤预测模型、多尺度仿真方法，特别是结合复合材料构件从静态、动态以及循环载荷条件下的强度设计理论和仿真工作，对构件复杂加载模式下的损伤力学理论进行探索。

研究了碳纤维、凯芙拉纤维组合非对称混杂三维正交机织复合材料构件的设计方法，揭示了高速冲击下的力学和破坏行为[18]。在复合材料构件动力学设计中引入结构层次、长度尺度，可丰富传统构件的抗冲击、减隔振功能；利用该策略，总结了分级纤维增强复合材料、分级多孔材料、分级功能表面和高韧性陶瓷复合材料构件的设计方法，研判了分级复合材料设计和优化方向的研究挑战[19]。将多级复合材料构件作为变形结构动响应设计平台，设计各层的约束、自适应、预应力以实现构件形状与刚度的大范围动态控制，为开发形状和功能可动态调控的复合材料构件提供了新思路[20]。

复合材料构件动力学设计方法将有效解决装备结构效能提升方面的瓶颈问题，需针对动力学设计与仿真开展深入研究，如减振降噪及抗冲击性能一体化动力学设计、多模感知与可重构集成设计等；最终建立适应复合材料构件变构型、减隔振、抗冲击的动力学设计理论，冲击疲劳等工况下的强度与失效仿真方法。

（三）复合材料构件的数据驱动仿真方法

数据驱动仿真方法是以大量数据来推动材料及结构计算的分析方法，旨在降低与本构建模、多尺度模拟相关的智力消耗与时间成本。根据数据驱动方法在模拟过程中所采取策略的不同，主要分为两类。

一是基于能量/距离泛函的数据驱动仿真方法。对材料本构数据进行拟合分析，获得等效的本构关

系或等效的应变能密度函数，在计算力学框架下通过能量/距离求极值来得到问题的解。使用本构数据拟合了非均质材料的显式等效应变能密度函数，进而获得材料的等效本构关系[21]；使用神经网络来训练材料的隐式等效本构关系（见图1），在降低训练所需样本的同时，显著提高了仿真效率[22]。基于距离泛函的数据驱动算法，对本构数据点与满足守恒定量点的距离求极值，可在无需数据拟合的情况下求得响应[23]。

二是基于聚类分析的数据驱动仿真方法。对复合材料构件的细观代表性胞元（RUC）进行分块或粗粒化，降低仿真的求解规模。基于数据驱动的自洽聚类分析方法（SCA）[24]是此方向上的开拓性工作，先在离线阶段计算高保真RUC模型中各个单元的弹性应变响应，后据此进行聚类分析，将高保真RUC模型压缩为基于聚类的缩减RUC模型。进一步，考虑材料弹塑性损伤的数据驱动自洽聚类分析SCA方法[25,26]被提出，实现了三维编织复合材料细观单胞非线性力学行为的快速求解；衍生的数据驱动SCA²方法、FE-SCA²方法，显著降低了计算成本，避免了宏–细–微观不同尺度耦合导致的维度灾难问题（见图2），实现了具有复杂微细观结构的复合材料与结构力学性能并发多尺度计算。

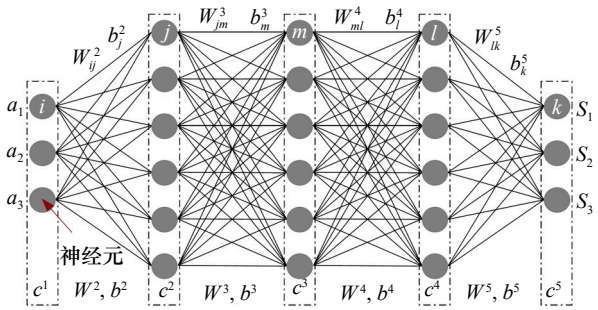

图1　基于神经网络算法训练等效本构关系示意图

基于数据驱动的SCA方法极大提升了复合材料细观RUC的求解效率，有望实现大尺寸构件的并发多尺度模拟。需从面向数据驱动复合材料设计专用数据库角度出发，构建数据集处理数据，结合机器学习等技术来提高构件设计能力。随着数据数量增加、质量提升，专用数据库中可挖掘的研究主题会越来越多，面向更多功能的数据驱动复材构件设计和开发将会持续推进和扩展。

（四）复合材料构件强度与寿命仿真评价方法

目前，复合材料结构的构件强度、寿命强度及检测等研究较多。对复合材料结构采用静载试验、无损检测等方式获得构件的强度、刚度、抗裂性等参数，在与相应理论值对比的基础上评估结构状态[27]。采用动力法（如起振设备、大偏心质量震动器、液压起振器）激励纤维增强复合材料结构，获得结构固有频率、振型、阻尼等动力参数，据此分析结构的动力学性能并为结构安全状态评估提供依据[28]。然而，先进复合材料构件制造过程以及构型具有复杂性，初始缺陷不可避免，在不同使用环境下还会产生不同程度的扩展；极端和复杂环境下复合材料构件强度评价的等效实验设计、测量标准、虚拟仿真实验方法等有所缺失，制约了装备升级换代与服役可靠性。因此，亟需发展极端环境下结构强度与寿命的高保真模拟及仿真评价方法。

对不同尺度的复合材料结构件开展强度、刚度评价，因工程中结构件的尺寸较大、外形复杂，不同结构区域的测量信号特征有差异，相应的检测方法面临诸多挑战[29]；评价结果易受环境温度、振动、结构件形状、表面状况等参数变化的影响。设计了玻璃纤维平纹编织复合材料实验样品，结合微焦点电子计算机断层扫描（Micro-CT）原位拉伸实

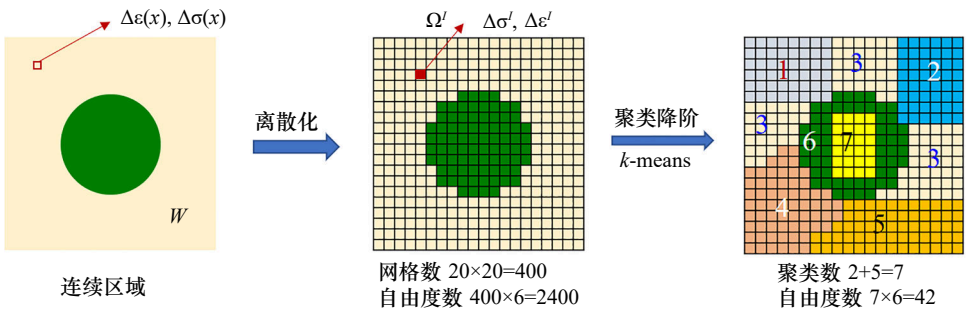

图2　数据驱动自洽聚类分析仿真方法示意图

验装置开展原位剪切力学实验[30]；Micro-CT 图像表征了典型制造工艺引起的孔洞缺陷分布规律、多尺度微结构演化及失效过程，为面向工程应用的复合材料构件参数特征提取与仿真提供了基础。在此基础上，通过蒙特卡洛法和布尔运算，实现了含有统计纱线几何参数、孔洞缺陷的平纹编织复合材料结构高保真建模；结合复合材料渐进损伤理论进行失效过程模拟，实现模量、强度、损伤演化过程的高效率和高保真预测，揭示了制造工艺缺陷对平纹编织复合材料失效过程的影响规律。也要注意到，对于复合材料构件的特大变形、强不连续、多尺度冲击失效等问题，现有的复合材料理论和分析方法未能获得全面验证，国产软件平台的仿真计算误差难以确定。因此，亟需建立考虑复合材料构件基材、构型、缺陷特征的复合材料结构件强度及剩余寿命预测理论和仿真方法。

基于有限元方法分析复合材料与结构的损伤、疲劳等特性，据此评估复合材料强度与寿命，是当前常用且有效的研究手段，如预测局部损伤并拓展至整体性能退化层面，最终获得层压板的疲劳寿命分析结果[31]。影响复合材料层合板疲劳性能的因素包括：纤维和基体类型、纤维方向、纤维体积分数、平均应力与应力比、加载频率、环境因素（湿热）等。近年来，结合复合材料结构的数值分析结果来评估疲劳寿命和强度行为的方法主要有：疲劳寿命模型，基于剩余刚度、剩余强度的唯象模型，渐进损伤模型（机理模型）[32]。例如，基于连续损伤力学理论，发展了复合材料内部损伤的萌生、扩展模型以及疲劳损伤模型，适用于多级载荷工况下的复合材料疲劳失效数值模拟分析[33]；将剩余应变作为损伤参量并表征疲劳寿命，建立基于应变的疲劳损伤判据并以剩余强度为失效判据，实现了复合材料疲劳寿命预测[34]；通过数值模拟方式建立纤维复合材料界面开裂、纤维开裂模型，评估了复合材料疲劳寿命与性能[35]。

随着 AI 技术的进步，基于 AI 预测复合材料与结构损伤、疲劳性能等效率很高。借鉴统计理论、基于机器学习的分析方法[36]，在复合材料与结构的剩余寿命预测方向获得了成功探索。采用深度神经网络（如卷积神经网络、自动编码器、循环神经网络），针对原始数据进行深度学习，进而表征复合材料的强度特性[37]；基于机器学习方法，对玻璃环氧复合材料热成像疲劳损伤进行仿真分析，用于复合材料与构件的安全评估及优化，实现了远程结构健康监测[38]；在一体成形复合材料中内嵌温度传感器、分布式光纤器，实现了复合材料服役性能和状态的实时监控及检测，也可对复合材料内部的缺陷和损伤进行完整性评价[39]。

四、复合材料构件设计理论及仿真的重点发展方向

（一）极端和多场环境下复合材料构件的设计理论

目前，复合材料构件的多场耦合问题研究多是基于实验数据的定性评估或弱耦合研究，如复合材料的力学 – 热氧化耦合研究较多采用加速老化试验等手段对性能劣化进行经验评估，或基于弱耦合模型开展理论与数值分析。然而，复合材料热氧化本质上是一种由扩散 – 反应耦合过程驱动的高度非线性现象，与力学响应表现为强耦合作用，已有研究方法无法从机理层面解决随化学反应进程而演化的力学问题。

引入化学反应动力学模型，从机理角度研究复合材料力 – 化耦合及其损伤演化是有价值的发展方向。热氧化过程的化学反应、力学变形均涉及功能转换，在热力学框架下将力学、化学反应动力学建立关联，据此形成热力学一致、考虑塑性与损伤的复合材料多场本构模型；建立失效准则，开展复合材料变形与损伤的多尺度计算与实验表征，揭示宏 / 细观多场耦合响应及损伤演化机理。

复合材料在外载荷、热氧化等多物理场作用下的耦合变形和损伤演化是典型的多尺度问题（见图 3），涉及宏观复合材料、细观尺度纤维束、微观尺度纤维 / 基体的多场耦合变形与损伤，是复杂环境下复合材料构件设计及仿真分析的难题[40~42]。多场耦合载荷下的复合材料构件多尺度设计理论与仿真，是未来重要研究方向之一。

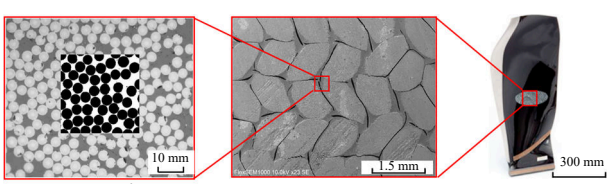

图 3　编织复合材料不同尺度结构示意图

（二）复合材料构件动力学分析与设计理论

在爆炸、冲击等动态荷载作用下，复合材料构件的响应行为与静荷载作用工况存在差异性，特别是在应考虑载荷作用的随机性、时效性以及材料/结构性能演化的情况下。随着材料–结构–功能一体化设计水平的提升，新型多功能复合材料构件已经完成开发并投入应用，为材料动态响应行为研究提供了机遇。

材料–构件–功能一体化设计方面的新进展、新成果为复合材料构件动态力学行为研究提供了宽阔空间，特别是非经典现象及新概念的引入（如负质量、负模量、密度张量、单向传播、拓扑保护），为学科发展带来了新动力。基于动态本构关系的复合材料构件动力学设计理论与仿真技术，依然是具有活力的研究方向。

（三）数据驱动的复合材料构件仿真方法

基于能量/距离泛函的数据驱动仿真方法、基于聚类分析的缩减降阶模型，都存在诸多尚未解决的关键科学问题，需在3个方向实施重点突破。① 发展复合材料代表性单胞基因库、典型结构基因库，支持实现复合材料构件一体化设计及评估；② 改进现有的数据驱动算法，支持复合材料构件非线性并发多尺度模拟的准确预测；③ 复合材料构件分析能力目前主要依赖商用软件，亟需融合数据驱动仿真方法与计算力学相关软件，发展以高质量数据库、高效率数据驱动算法为核心的多尺度计算分析平台（见图4）。

（四）复合材料构件强度与寿命仿真评价方法

从复合材料损伤机理角度出发，利用连续介质损伤力学、剪滞模型、变分理论、帕里斯定律等理论，表征复合材料与结构的损伤、缺陷特征并建立结构参数随载荷作用变化的数值模型，据此开展强度与寿命仿真评价研究，是当前的通行做法；采用基于无损检测技术的多尺度缺陷特征及结构参数，建立含真实缺陷的三维有限元模型，据此预测复合材料的疲劳寿命，为复合材料剩余强度及疲劳寿命评估理论和技术研究提供可靠依据，也是常规性研究。值得指出的是，传统的强度与寿命评价方法已不能完全适应材料应用的新形势，需要集成连续介质疲劳理论、多场耦合跨尺度分析方法、有限元相场、有限元统计法，建立复合材料构件数字仿真新方法；依托智能算法与实验检测手段，建立复合材料构建设计与分析软件平台，发展更高效、更精确的强度与寿命评价方法体系（见图5）。

相关研究可在六方面具体展开。① 考虑工程应用中的测量误差、材料特性分散性、不同损伤机制的随机性对损伤过程的影响物理机制，发展精确耦合的疲劳损伤模型和评价技术；② 开发针对循环疲

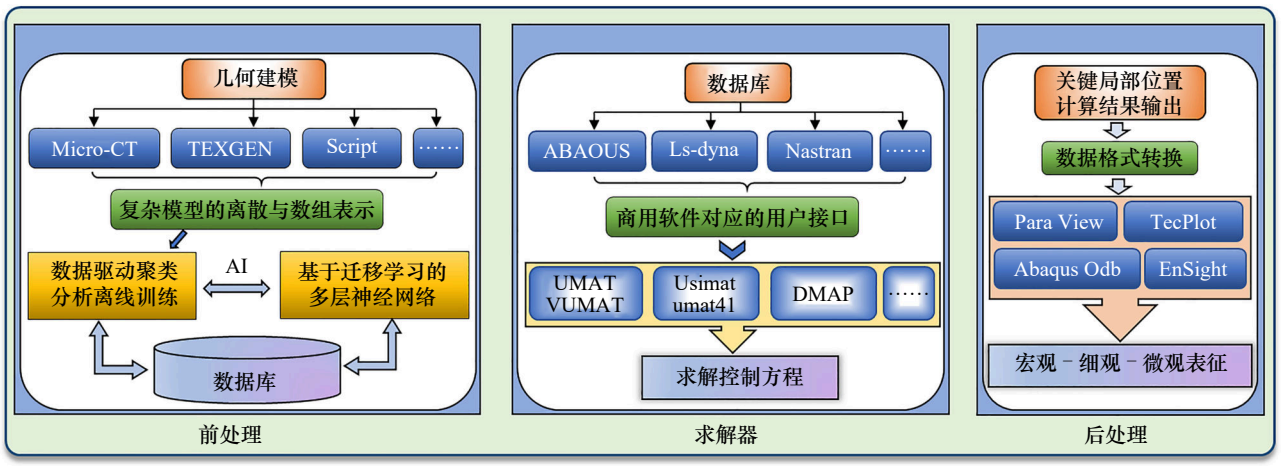

图4 先进复合材料结构一体化多尺度计算平台示意图

注：TEXGEN表示由诺丁汉大学开发、用于编织结构几何建模的开源软件；Scipt表示计算机脚本；ABAQUS表示由达索公司开发、用于工程模拟分析的通用有限元软件；Ls-dyna表示由LSTC公司开发、用于通用结构分析的非线性有限元程序；Nastran表示由美国国家航空航天局开发、用于结构分析的大型应用有限元程序；UMAT表示ABAQUS中的用户材料子程序；VUMAT表示ABAQUS中求解器对应的材料子程序；Usrmat表示Ls-dyna中的用户定义材料；umat41表示Ls-dyna中的用户子程序；DMAP表示Nastran中的直接矩阵提取程序；ParaView表示由桑迪亚国家实验室、Kitware公司、洛斯阿拉莫斯国家实验室联合开发的开源可视化软件；TecPlot表示由Tecplot公司研发的数据分析和可视化处理软件；Abaqus Odb表示ABAQUS后处理输出数据库；EnSight表示由CEI公司开发、用于科学和工程可视化与后处理的软件。

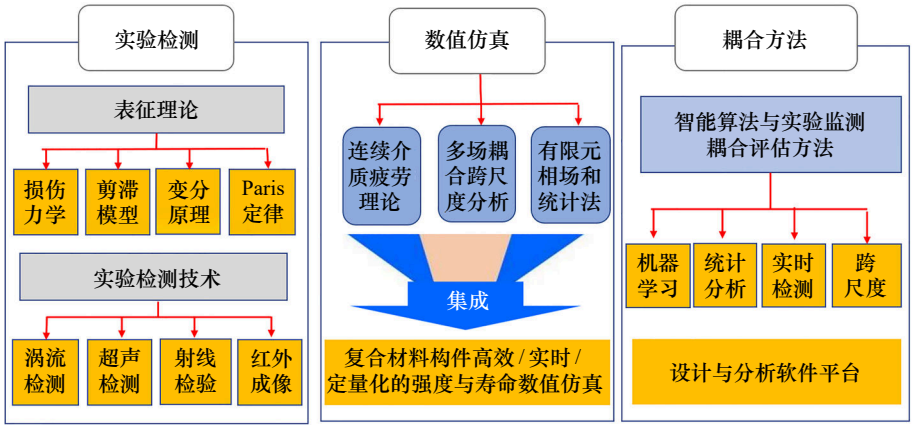

图5　复合材料构件强度与寿命仿真评价方法体系

劳损伤萌生与演化过程的高精度在线检测技术，尤其是微米级疲劳裂纹的损伤演化特征研究，推动基础科研向高端工程应用的转变；③ 基于大数据和AI算法，提高损伤和疲劳数值分析结果的可靠性，形成覆盖复合材料结构从生产制造到应用服役再到退役全过程的分析与检测体系，实现由小尺度缺陷、大尺度损伤引起的复合材料力学性能变化的数值分析与性能评估能力；④ 针对耦合场（热、电、磁、化学腐蚀）作用下的先进复合材料结构，发展耦合复杂环境效应的跨尺度、多层次损伤描述与疲劳寿命分析方法；⑤ 发展内置传感检测的复合材料制备技术，实时监控并表征刚度、强度、功能参数等性能指标，为智能复合材料与结构的损伤和寿命评价提供可靠依据；⑥ 发展基于耐损伤生物结构的物理机制，突破多层级、跨尺度复合材料结构设计技术，形成自适应的智能损伤与疲劳寿命数值模型。

五、复合材料构件设计理论及仿真研究建议

（一）面向装备工程应用的复合材料构件多场多尺度设计技术

针对重大装备对复合材料构件的应用需求，综合理论、数值、实验研究手段，采用微观–细观–宏观、自下而上的研究策略，系统开展复合材料构件力–热–化耦合变形与破坏的多尺度分析，形成多场多尺度设计理论与技术体系。发展多场耦合环境下聚合物基体及纤维的力–热–化等耦合理论模型，揭示温度、氧浓度、氧化时间等因素对复合材料组分弹塑性变形、损伤演化的影响规律。建立复合材料细观单元均匀化的多场耦合本构关系及失效准则，实现复合材料耦合变形与损伤失效评估。发展复合材料多场耦合变形与破坏的多尺度计算方法，从宏/细观尺度揭示服役条件对耦合变形、损伤演化与破坏的影响机制。形成复合材料–结构一体化的多场多尺度设计技术与结构完整性评价体系，支撑重大装备创新发展。

（二）动载荷条件下复合材料构件性能设计技术

在超高应变率下的复合材料构件变形机理及设计理论方面，着力突破微秒/皮秒级复合材料与结构的动态仿真方法、材料内部微观变形的表征技术。在交变载荷下的复合材料构件设计理论方面，建立复合材料构件的塑性变形、微结构/微缺陷演化以及相变的物理机制与动态力学行为仿真方法。在动载荷下的复合材料构件变形机理及设计理论方面，自主研制基于微观物理机制的复合材料构件动强度模型、设计理论、仿真技术。在复合材料构件优化设计理论与方法方面，具备流固耦合、爆炸冲击等复杂载荷作用下复合材料构件动态响应优化，基于动态均匀化理论、面向波动行为精准控制的复合材料构件多尺度优化等能力。

（三）数据驱动的复合材料构件设计与仿真技术

复合材料构件的数据驱动仿真方法方兴未艾，基础在于材料/结构数据库，核心在于将数据驱动算法引入计算力学控制方程中；通过多学科、多理论的交叉融合，实现材料多尺度到结构多尺度的技术突破，构建材料基因库与结构基因库并重的材料结构一体化设计评估方法。在数据库方面，将材料

属性与结构变形耦合，发展材料构件一体化的基因数据库，形成可靠的材料结构孪生数字体；将材料基因与结构基因融入数据驱动仿真过程，发展基于物理机制驱动的计算力学新方法；发展多范式耦合的高通量、高精度交互计算平台，全面打通数据科学、复合材料力学、计算力学之间的壁垒。

（四）复合材料构件强度与寿命仿真软件平台

针对复杂多场耦合环境下具有特定编织和微观结构形式的复合材料构件，发展渐进式疲劳损伤模型，更全面地预测失效模式、受静态和疲劳载荷作用的复合材料失效进展，实现预测更精确、成本更低廉。建立微观力学与有限元分析、损伤与断裂跟踪及缺陷建模相结合的计算技术与软件平台，丰富与此类缺陷相关的损伤分析与疲劳评价手段。发展超高周疲劳失效机理与寿命预测理论、构件宏微观断裂力学与强度理论、尺度相关损伤理论、构件多尺度损伤辨识理论和方法。借助CT等技术重建材料微结构，形成材料级、构件级、结构级等不同层次的复合材料构件强度与寿命仿真软件平台。

参考文献

[1] 白刚, 肖伟, 高锋, 等. 功能型复合材料在深空探测任务中的应用研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(5): 41–50.
Bai G, Xiao W, Gao F, et al. Research progress on application of functional composite materials in deep space exploration mission [J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(5): 41–50.

[2] Herwig T, Wagner W. On a robust FE^2 model for delamination analysis in composite structures [J]. Composite Structures, 2018, 201: 597–607.

[3] 崔灿, 茅献彪. 三维五向编织复合材料的冲击压缩特性及破坏机制 [J]. 航空材料学报, 2022, 42(1): 81–91.
Cui C, Mao X B. Impact compression characteristics and failure mechanism of 3D five-directional braided composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2022, 12(1): 81–91.

[4] 邢丽英, 李亚锋, 陈祥宝. 先进复合材料在航空装备发展中的地位与作用 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(9): 4179–4186.
Xing L Y, Li Y F, Chen X B. The status and role of the advanced composite materials in the development of aviation equipment [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4179–4186.

[5] 阳杰, 徐锐, 黄群, 等. 数据驱动计算力学研究进展 [J]. 固体力学学报, 2020, 41(1): 1–14.
Yang J, Xu R, Huang Q, et al. Data-driven computational mechanics: A review [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2020, 41 (1): 1–14.

[6] 杜善义, 关志东. 我国大型客机先进复合材料技术应对策略思考 [J]. 复合材料学报, 2008, 25(1): 1–10.
Du S Y, Guan Z D. Strategic considerations for development of advanced composite technology for large commercial aircraft in China [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(1): 1–10.

[7] 张丽华, 范玉青. 复合材料在飞机上的应用评述 [J]. 航空制造技术, 2006 (3): 64–66.
Zhang L H, Fan Y Q. Review of composite materials in aircraft applications [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006 (3): 64–66.

[8] Zhao Y N, Ai S G, Fang D N. Elasto-plastic phase field modelling of oxidation of zirconium alloys [J]. International Journal of Solids and Structures, 2018, 134: 30–42.

[9] Gigliotti M, Olivier L, Vu D Q, et al. Local shrinkage and stress induced by thermo-oxidation in composite materials at high temperatures [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2011, 59(3): 696–712.

[10] Konica S, Sain T. A thermodynamically consistent chemo-mechanically coupled large deformation model for polymer oxidation [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2020, 137: 1–14.

[11] Konica S, Sain T. A homogenized large deformation constitutive model for high temperature oxidation in fiber-reinforced polymer composites [J]. Mechanics of Materials, 2021, 160: 1–15.

[12] Qin B, Zhong Z. A theoretical model for thermo-chemo-mechanically coupled problems considering plastic flow at large deformation and its application to metal oxidation [J]. International Journal of Solids and Structures, 2021, 212: 107–123.

[13] Masson J, Gigliotti M, Grandidier J, et al. Numerical method to assess the stress state and gradients induced by thermo-oxidation in adhesively bonded joints for aircraft engine applications [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2022, 113: 1–15.

[14] Zhang M, Sun B Z, Gu B H. Meso-structure ageing mechanism of 3-D braided composite's compressive behaviors under accelerated thermo-oxidative ageing environment [J]. Mechanics of Materials, 2017, 115: 47–63.

[15] Zhang M, Sun B Z, Gu B H. Experimental and numerical analyses of matrix shrinkage and compressive behavior of 3-D braided composite under thermo-oxidative ageing conditions [J]. Composite Structures, 2018, 204: 320–332.

[16] Liu S K, Zhang J J, Shi B H, et al. Damage and failure mechanism of 3D carbon fiber/epoxy braided composites after thermo-oxidative ageing under transverse impact compression [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 161: 677–690.

[17] Yang Q S, Ma L H, Shang J J. The chemo-mechanical coupling behavior of hydrogels incorporating entanglements of polymer chains [J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50 (14–15): 2437–2448.

[18] Ahmed S, Zheng X T, Yan L L, et al. Influence of asymmetric hybridization on impact response of 3D orthogonal woven composites [J]. Composites Science and Technology, 2020, 199: 1–13.

[19] Chen Y L, Ma Y, Yin Q F, et al. Advances in mechanics of hierarchical composite materials [J]. Composites Science and Technology, 2021, 214: 1–12.

[20] Wei Y L, Yang Q S, Ma L H, et al. Design and analysis of 2D/3D negative hydration expansion Metamaterial driven by hydrogel [J]. Materials & Design, 2020, 196: 1–15.

[21] Yvonnet J, Gonzalez D, He Q C. Numerically explicit potentials for the homogenization of nonlinear elastic heterogeneous materials [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2009, 198(33–36): 2723–2737.

[22] Yang H, Guo X, Tang S, et al. Derivation of heterogeneous material laws via data-driven principal component expansions [J]. Computational Mechanics, 2019, 64(2): 365–379.

[23] Kirchdoerfer T, Ortiz M. Data-driven computational mechanics [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2016, 304: 81–101.

[24] Liu Z L, Bessa M A, Liu W K. Self-consistent clustering analysis: An efficient multi-scale scheme for inelastic heterogeneous materials [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2016, 306: 319–341.

[25] He C W, Ge J R, Gao J Y, et al. From microscale to mesoscale: The non-linear behavior prediction of 3D braided composites based on the SCA^2 concurrent multiscale simulation [J]. Composites Science and Technology, 2021, 213: 1–15.

[26] He C W, Ge J R, Lian Y P, et al. A concurrent three-scale scheme FE-SCA^2 for the nonlinear mechanical behavior of braided composites [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2022, 393: 1–15.

[27] 万晔, 严川伟, 屈庆, 等. 钢筋混凝土失效检测及其耐久性研究进展 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(1): 42–44.
Wan Y, Yan C W, Qu Q, et al. Progress in studies on failure detection and curability of reinforced concrete [J]. Corrosion Science amd Protection Technology, 2002, 14(1): 42–44.

[28] Wei J, Wu X H, Zhao X L. A model for concrete durability degradation in freeze-thawing cycles [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2003, 16(4): 353–358.

[29] 李中权, 肖旅, 李宝辉, 等. 航天先进轻合金材料及成形技术研究综述 [J]. 上海航天, 2019, 36(2): 9–21.
Li Z Q, Xiao L, Li B H, et al. Review of study on advanced light alloy materials and forming technique in spaceflight industry [J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(2): 9–21.

[30] Zeng Q L, Sun L J, Ge J R, et al. Damage characterization and numerical simulation of shear experiment of plain woven glass-fiber reinforced composites based on 3D geometric reconstruction [J]. Composite Structures, 2020, 233: 1–15.

[31] Brod M, Dean A, Rolfes R. Numerical life prediction of unidirectional fiber composites under block loading conditions using a progressive fatigue damage model [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 147: 1–15.

[32] Costa J, Turon A, Trias P M D, et al. A progressive damage model for unidirectional fibre-reinforced composites based on fibre fragmentation. Part II: Stiffness reduction in environment sensitive fibres under fatigue [J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(14): 2269–2275.

[33] Shabani P, Taheri-Behrooz F, Maleki S, et al. Life prediction of a notched composite ring using progressive fatigue damage models [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 165: 754–763.

[34] Laribi M A, Tamboura S, Fitoussi J, et al. Fast fatigue life prediction of short fiber reinforced composites using a new hybrid damage approach: Application to SMC [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 139: 155–162.

[35] Hanhan I, Sangid M D. Damage propagation in short fiber thermoplastic composites analyzed through coupled 3D experiments and simulations [J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 218: 1–15.

[36] Manujesh B J, Prajna M R. Damage detection and classification for sandwich composites using machine learning [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 52(3): 702–709.

[37] Yu M H, Kim H S. Deep-learning based damage sensing of carbon fiber/polypropylene composite via addressable conduction network [J]. Composite Structures, 2021, 267: 1–15.

[38] Sarhadi A, Albuquerque R Q, Demleitner M, et al. Machine learning based thermal imaging damage detection in glass-epoxy composite materials [J]. Composite Structures, 2022, 295: 1–15.

[39] 郭艳丽, 李旭, 叶金蕊, 等. 高密度分布式光纤传感技术在FRP复合材料结构健康监测中的应用 [J]. 复合材料学报, 2013, 30(S1): 247–250.
Guo Y L, Li X, Ye J R, et al. High-density distributed fiber optic sensing system based on rayleigh backscattering effect [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(S1): 247–250.

[40] Naya F, González C, Lopes C S, et al. Computational micromechanics of the transverse and shear behavior of unidirectional fiber reinforced polymers including environmental effects [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 92: 146–157.

[41] Shi B H, Zhang M, Liu S K, et al. Multi-scale ageing mechanisms of 3D four directional and five directional braided composites' impact fracture behaviors under thermo-oxidative environment [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 155: 50–65.

[42] Budwal N, Kasper K, Goering J, et al. Flexible low-cost tooling solutions for a one-shot resin infusion of a 3D woven and multitextile preform [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 51: 856–863.