机织复合材料损伤演化研究进展

果立成*, 廖锋, 李志兴*, 黄金钊, 赵九州, 郑滔

哈尔滨工业大学航天科学与力学系, 哈尔滨 150001

* E-mail: guolc@hit.edu.cn; lizx@hit.edu.cn

收稿日期: 2020-03-24; 接受日期: 2020-06-22; 网络版发表日期: 2020-07-16

国家自然科学基金(批准号: 11972134)、航空科学基金(编号: 2017ZF77008)和黑龙江省自然科学基金(编号: ZD2019A001)资助项目

摘要 机织复合材料内部交织的纱线使得其相较于铺层复合材料具有更好的整体性和抗分层性能, 但也使得这类材料的失效机理更加复杂, 给此类材料的损伤演化研究带来了极大的挑战. 本文从机织复合材料的试验技术、损伤演化模型与仿真方面总结和评述了机织复合材料损伤演化研究的现状. 在试验技术方面, 着重总结了表征机织复合材料损伤演化的试验手段, 主要包括基于应变、声发射技术、红外特征和CT技术的损伤表征. 概要地评述了各方法的使用条件以及面临的问题和挑战. 在损伤演化模型和仿真方法方面, 以材料受到的载荷特征为主线, 总结了机织复合材料在静态、疲劳以及冲击载荷作用下的典型研究方法. 基于上述总结, 提出了未来机织复合材料损伤演化研究的发展方向, 包括多手段集成的损伤机理表征、损伤关联的宏细观基础力学性能测试、宏细观强度准则及强度设计、机器学习算法与有限元等方法相结合的仿真模型以及复杂条件下基于数字孪生概念和全寿命周期的使役性能研究等.

关键词 机织复合材料, 损伤表征, 损伤机理, 损伤演化模型与仿真, 试验技术

1 引言

现代复合材料的理论与应用研究肇始于19世纪40年代^[1]. 近年来, 随着工业化的逐步深入和节能减排的需要, 轻质高强的复合材料正逐渐成为研究机构和工业领域所关注的焦点. 经过近半个世纪的研究和发展, 依据增强体结构类型的不同, 复合材料已演化和细分为长纤维增强复合材料、短切纤维增强复合材料、颗粒增强复合材料等多种类型. 在上述复合材料中, 长纤维复合材料由于兼具优异的刚度和强度性能以及较小的密度, 正逐步成为航空、航天、船舶、汽车等迫切

需要对产品减重的工业领域的发展重点^[2,3]. 机织复合材料是一种典型的长纤维复合材料, 由机织物、基体以及纤维基体间的界面相组成. 与传统的铺层复合材料相比, 机织复合材料在经纬两方向均表现出良好的稳定性. 常见的机织复合材料又分为二维和三维等形式. 二维机织复合材料增强结构又常分为平纹机织、斜纹机织和缎纹机织等结构^[4,5], 见图1. 三维机织复合材料又分为三维正交机织复合材料、层-层接结角连锁机织复合材料以及贯穿接结角连锁机织复合材料等种类^[5,6], 见图2. 随着机织工艺的进步, 三维机织复合材料的应用前景愈发广阔. 部分学者已经尝试将其应

引用格式: 果立成, 廖锋, 李志兴, 等. 机织复合材料损伤演化研究进展. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 876–896

Guo L C, Liao F, Li Z X, et al. Research progress in damage evolution of woven composites (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 876–896, doi: 10.1360/SST-2020-0123

图 1 机织基本织物组织. (a) 平纹组织; (b) 斜纹组织; (c) 缎纹组织^[4]

Figure 1 Structures of woven fabrics. (a) Plain weave; (b) twill weave; (c) satin weave [4].

图 2 (网络版彩图)典型三维机织复合材料. (a) 正交机织复合材料; (b) 层-层接结角连锁机织复合材料; (c) 贯穿接结角连锁机织复合材料^[6]

Figure 2 (Color online) Typical 3D woven composites. (a) Orthogonal; (b) layer-to-layer angle-interlock; (c) through-the-thickness angle-interlock [6].

用于船舶^[7]、生物医学^[8]和土木工程领域^[9]. 当前世界上最先进的航空发动机——法国CFM公司设计的LEAP-X发动机, 其风扇叶片就采用三维机织复合材料制成, 在提高叶片抗疲劳和抗冲击性能的同时, 大幅度地降低了发动机的质量. 其叶片总重76 kg, 仅叶片就比上一代发动机减重32 kg^[10,11].

为了便于机织复合材料的应用和结构优化设计, 各国学者针对机织复合材料在不同载荷工况下的损伤演化机理展开了深入的试验研究^[12~15]. 对比二维机织复合材料和三维机织复合材料, 可以发现两者的损伤模式有所不同. 在准静态载荷和疲劳载荷下, 二维机织复合材料除了界面脱黏、纱线内部裂纹和基体开裂之外, 还可能出现较明显的分层现象^[16,17], 而三维机织复合材料表现出更优良的整体性以及更高的损伤容限^[18]. 在冲击载荷下, 三维机织复合材料的损伤面积更小, 冲击损伤阻抗更高^[19], 这与Z向纱线的绑定作用有关. 依据这些研究结果, 学者们提出了大量仿真方法和预测模型, 极大地推动了机织复合材料的发展和应用^[20~22].

本文以机织复合材料在多种载荷工况下的损伤行为为研究对象, 以机织复合材料损伤演化试验技术和损伤演化模型与仿真方法为主线, 总结和梳理了近年来机织复合材料损伤演化研究现状, 讨论了机织复合材料损伤演化的未来发展.

2 机织复合材料损伤表征及损伤机理研究方法

2.1 基于应变的机织复合材料损伤表征

应力-应变曲线是表征材料力学行为最基础的物理关系. 因此, 机织复合材料损伤的应变表征一直是材料损伤表征最基本也是最重要的方法. 常用的获取应变的试验方法有: 应变片测试方法、引伸计测试方法和数字图像相关(DIC)测试方法等.

应变片测试方法是在试验件表面粘贴电阻应变片. 在加载过程中, 测量电阻中电流的变化来表征试验件表面的应变. 直到现在, 其仍是实验室和工业界最常用的测试材料应变的方法. 正如前文所提到的, 机织复

合材料具有独特的重复结构(单胞). 因此, 为了获得机织复合材料的等效应变, 应变片尺寸应覆盖测试应变方向上机织复合材料的最小单胞尺寸^[23~25]. 此外, 应变片测试方法也被广泛用于霍普金森杆试验中, 用于测试试验件在高应变率下的应力应变曲线. Zhao等人^[26]利用霍普金森杆结合应变片测试方法研究了三维机织复合材料的动态力学性能, 见图3. 试验结果显示, 三维机织复合材料的模量和强度随应变率的变化规律因加载方向和载荷方式的不同而发生改变. 应变片测试方法的精度及数据可靠性会受粘贴技术以及应变片在外部载荷作用下自身损伤状况的影响. 这给此方法在疲劳和冲击试验领域的应用带来了一定的挑战.

机织复合材料在疲劳载荷作用下的刚度退化是表征其力学性能变化的常用手段. 现有文献表明, 引伸计方法是测试材料刚度随疲劳周次增长而退化的主要方式之一^[27~29]. Daggumati等人^[30]利用动态引伸计研究了缎纹复合材料在拉-拉疲劳载荷作用下的刚度退化. 结果表明, 在疲劳初始阶段机织复合材料的刚度会发生较大的退化. 在使用该方法测试材料疲劳刚度退化时, 为避免材料最终失效对引伸计的冲击, 常常在材料失效前移除引伸计, 导致无法获取试验件最终失效前的刚度退化. 为解决这一问题, Xu等人^[31]结合数字图像相关技术和试验机横梁位移数据, 实现了对材料疲劳全过程刚度退化的测量. 具体方法见公式(1)~(3).

$$D_{\text{sample}}(F) = \varepsilon_{\text{sample}} \cdot L_{\text{sample}}, \quad (1)$$

$$D_{\text{machine}}(F) = D_{\text{total}}(F) - D_{\text{sample}}(F), \quad (2)$$

$$D_{\text{sample}}(F) = D_{\text{total}}(F) - D_{\text{machine}}(F), \quad (3)$$

式中, L_{sample} 表示试验件的自由段长度, D_{sample} 表示当试验件应变为 $\varepsilon_{\text{sample}}$ 时试验件的伸长量, D_{machine} 为试验件应变为 $\varepsilon_{\text{sample}}$ 时试验机自身的变形, D_{total} 为试验机的总位移. 引伸计的应用也有其局限性, 该方法只能用于形状规则的材料级试验件, 且对安装空间有严格的限制, 过小的测量区域很难找到与其匹配的小型引伸计. 同时, 采用该方法只能获得试验件的平均应变, 无法获取材料的全局应变场, 故其对材料的局部损伤表征能力有限.

数字图像相关技术(DIC)是逐渐被广泛应用的测量试验件表面位移及应变的方法. 其通过对比变形前后试验件表面散斑位置来计算试验件表面发生的位移和应变^[32]. Yang等人^[33]基于DIC技术研究了三维机织复合材料平板的高速侵彻问题, 利用高速相机获得了材料平板在冲击载荷作用下的全场应变, 并结合超声波C扫和光学显微镜研究了材料在冲击载荷作用下的损伤机理, 试验装置和应变场演化结果见图4和5. 随着CT技术的进步, 众多学者尝试将数字图像相关技术与CT相结合, 提出可以表征试验件内部应变的数字体图像相关方法(DVC)^[34,35]和数字体散斑法(DVSP). Mao等人^[36]运用数字体散斑法实现了对机织复合材料梁在三点弯载荷作用下内部应变的测量. 采用数字图像相关技术获得应变的准确性会受到散斑制作质量和散

图3 (网络版彩图)高速冲击载荷作用下三维机织复合材料应力-应变曲线. (a) 面外压缩; (b) 面内拉伸^[26]

Figure 3 (Color online) Stress-strain curves of 3D woven composite under high velocity impact loads. (a) Through-the-thickness compression; (b) in-plane tension ^[26].

图 4 (网络版彩图)高速侵彻试验装置^[33]

Figure 4 (Color online) Experimental setup of high velocity ballistic impact test ^[33].

图 5 (网络版彩图)冲击载荷作用下三维机织复合材料平板应变场演化过程^[33]

Figure 5 (Color online) Strain evolution of 3D woven composite plate under impact load ^[33].

斑随试验件损伤发生脱落情况的影响。

除了上述常见应变表征方法外,在材料内部植入纤维光纤传感器(FOS)也是一种测试试验件内部应变的方法。Daggumati等人^[37]采用在机织复合材料内部埋设FOS的方法研究了平纹机织复合材料内部的应变分布规律。

2.2 基于声发射技术的机织复合材料损伤表征

对于机织复合材料,声发射现象主要是指材料在外部载荷作用下,伴随着材料内部新裂纹面的萌生和

扩展而发生的能量以应力波形式释放的现象。20世纪50年代,德国学者Kaiser^[38]针对金属和非金属材料的声发射问题就已经开展了系统性的科学研究。他发现声发射现象是一种不可逆的物理现象——Kaiser效应。而后,诸多学者尝试依据声发射现象对材料的失效和损伤进行监测和定位^[39]。

随着复合材料的发展和广泛应用,声发射技术开始被尝试应用于复合材料及结构的损伤检测中^[40]。Berthelot等学者^[41]将声发射技术用于碳纤维复合材料的损伤识别中,研究了复合材料内部不同失效模式的

声发射特征. 20世纪90年代以后, 众多学者将声发射技术应用于机织复合材料的损伤和失效表征上. Morscher^[42]利用声发射技术研究了二维SiC机织复合材料在单轴拉伸和往复载荷作用下的失效过程, 运用时域和频域信号分析技术对材料内部的损伤类型、损伤位置进行了研究. Lomov等学者^[43,44]应用声发射技术对二维和三维机织复合材料在沿纤维方向和偏轴载荷作用下的失效过程展开研究. 声发射累积能量被用来划分材料的失效阶段, 所得的研究结果同应变数据和显微观测结果具有一致性.

除了用于机织复合材料在准静态载荷下的损伤表征外, 声发射技术还被应用于机织复合材料在疲劳及冲击作用下的失效表征. Takemura等学者^[45]利用声发射技术研究了平纹机织复合材料在拉-拉疲劳载荷作用下的损伤发展, 用平均声发射事件计数和声发射信号幅值表征材料内不同损伤模式随疲劳载荷的发生和发展. Shahkhosravi等学者^[46]研究了钻孔机织复合材料在三点弯疲劳载荷作用下的失效过程, 发现试验过程中采集到的声发射事件累积能量与损伤面积高度线性相关. Jin等学者^[47]运用声发射原理研究了三维机织复合材料在拉-拉疲劳载荷作用下的失效过程, 并依据声发射事件的计数将三维机织复合材料的拉-拉疲劳损伤失效过程划分为三个阶段. 该划分结果与材料刚度退化过程具有很高的一致性. Woo等学者^[48,49]结合声

发射检测系统和分离式霍普金斯杆系统, 设计了用于开展机织复合材料冲击损伤过程研究的试验系统, 见图6. 他们应用该系统研究了Kevlar纤维以及Kevlar-碳纤维混合机织复合材料在高应变率压缩载荷下的失效机理, 选择声发射振幅、声发射计数和累积声发射计数的斜率等参数表征机织复合材料的冲击损伤过程. 随着计算机计算能力的不断提高, 很多学者将声发射信号处理技术与聚类、自组织映射、人工神经网络等数据挖掘技术结合, 发展了新的声发射损伤过程表征方法, 并将其应用于机织复合材料的损伤表征之中^[50-55].

声发射方法可以实现对机织复合材料损伤过程的连续、无损和原位表征. 但由于机织复合材料受到机织结构、基体类型以及成型工艺的影响, 失效机理异常复杂, 声发射方法在损伤类型确认以及损伤程度量化等方面均有困难. 因此, 该方法同其他损伤识别方法相结合, 可以在解析机织复合材料损伤失效机理方面发挥更大的作用.

2.3 基于红外特征的机织复合材料损伤表征

材料发生损伤后, 损伤区域附近应力的变化、能量的释放以及裂纹面间的摩擦使得损伤区域的温度可能异于其他未损伤区域. 学者们根据这一现象将试验件表面红外特征用于材料损伤表征, 从而能够对材料

图6 (网络版彩图)霍普金森压杆-声发射系统装置示意图^[49]

Figure 6 (Color online) Schematic diagram of coupled SHPB-AE system ^[49].

开展非接触、原位和实时损伤评估。

红外特征表征方法在层复合材料的疲劳损伤研究中应用较早^[56-59], 在疲劳试验过程中, 试验件表面的温度上升曲线与材料的刚度退化曲线表现出很强的相关性, 均呈现三段式的发展规律。Naderi等人^[58-60]的研究表明层合复合材料在疲劳过程中的红外特征可以作为疲劳损伤表征的一种手段。近年来, 随着机织复合材料的广泛应用, 越来越多的学者关注机织复合材料的疲劳损伤, 而红外特征表征方法也成为一种检测机织复合材料疲劳损伤的有效手段。Montesano等人^[61,62]研究发现, 红外特征表征方法能够捕获材料在静态载荷作用下裂纹的萌生位置及扩展情况。此外, 研究结果表明, 机织复合材料表面的温度分布与裂纹的饱和度和循环加载时的刚度退化行为有关, 试验件表面温度可以用于捕获纱线裂纹及分层裂纹扩展等疲劳损伤机制。Shao等人^[63]采用热弹性应力分析方法(TSA)研究了基体的断裂韧性对平纹机织碳纤维乙烯基酯复合材料疲劳性能的影响, 发现在疲劳初始阶段, 基体的断裂韧性对平纹机织复合材料基体内的裂纹形成和演化起主导作用。Fruehmann等人^[64]采用热弹性应力分析方法研究了机织复合材料在单轴拉-拉疲劳载荷作用下的损伤演化行为。研究结果表明热弹性应力分析方法可以识别低应力水平下局部小尺度损伤的发展。Guo等人^[65]将红外热成像技术与DIC技术相结合, 研究了三维机织复合材料在面外剪切疲劳载荷作用下的力学行为, 见图7。他们阐明了材料的面外剪切疲劳迟滞

回线与试验件表面温度以及裂纹分布之间的相关性, 清晰地揭示了材料在面外疲劳载荷作用下的损伤机理和失效过程。表明材料刚度与温度的变化具有很强的相关性, 二者结合起来可以作为三维机织复合材料损伤评估的重要指标, 这在实际工程应用中很值得期待。Battams等人^[66]搭建了全场应变和全场温度同步采集系统, 结合DIC试验数据和TSA方法成功研究了铺层复合材料在疲劳载荷作用下的损伤演化。

2.4 基于CT技术的机织复合材料损伤表征

近年来, CT技术得到了快速的发展, 可以实现从宏观结构到单纤维尺度的损伤检测。随着机织复合材料被广泛关注, 在其损伤研究中, CT技术也被越来越多的学者所应用。

Yu等学者^[18,67]基于CT技术研究了三维编织复合材料在拉-拉疲劳载荷作用下的损伤演化过程。通过对不同加载周次后的疲劳试验件的显微观察, 识别出该类型材料在拉-拉疲劳载荷作用下内部的损伤类型以及渐进损伤阶段, 见图8。Jespersen等学者^[29]应用X射线 CT 对纤维增强复合材料的疲劳损伤开展研究, 在研究过程中, 作者运用多尺度方法研究了不同疲劳周次后试验件的损伤状态, 详细分析和描述了疲劳三阶段的损伤机理。Ogi等人^[68]运用X射线CT研究了三维SiC/SiC机织复合材料在高速金属子弹冲击下的损伤状态。X射线CT观测结果显示, 当撞击速度较低时, 撞击坑下方会产生多个锥形裂纹。当撞击速度超过临界

图7 (网络版彩图)三维机织复合材料剪切刚度退化与温度变化特征^[65]。(a)典型剪切迟滞回线对应的红外热成像和表面裂纹分布;(b)系统刚度变化和试件表面温度随着疲劳载荷次数增加的变化

Figure 7 (Color online) Shear stiffness degradation and temperature characteristics of 3D woven composites^[65]. (a) Typical shear hysteresis curve corresponding to the images of infrared thermography and photograph of crack distribution; (b) the variation of the system stiffness and the surface temperature of the specimen with the increase of fatigue loading cycles.

图 8 (网络版彩图)角连锁复合材料试验件内部的裂纹分布^[18]

Figure 8 (Color online) Internal crack distribution of angle-interlock composite specimen [18].

速度时,一个碎片从试验件后表面贯穿出来,碎片内部未发现纤维束断裂。Cao等人^[69]通过Micro-CT研究了三维机织复合材料在不同冲击能量作用下的损伤模式。按照冲击能量从低到高的顺序,材料内部分别出现了基体失效、纤维劈裂、界面损伤、分层及纤维断裂。

在外部载荷作用下,材料内部损伤的起始和扩展

过程研究对于确定材料失效机理以及损伤演化规律具有十分重要的意义。针对这一问题,目前已有部分学者采用原位检测方法获取复合材料的损伤演化规律^[70~72]。

碳纤维和环氧树脂往往具有相近的X射线吸收系数,这使得采用传统吸收成像方法的 μ CT对碳纤维与环氧树脂基体的分辨能力不足^[73]。针对这一问题, Li等学者^[72]提出了基于上海光源同步辐射CT开展三维机织复合材料面外损伤机理的原位试验方法,试验系统及流程如图9所示,并分别对三维机织碳纤维增强复合材料在面外拉伸和剪切载荷下的损伤演化进行了研究,获得了其损伤机理和破坏过程。部分CT结果如图10所示。研究表明,在面外拉伸和剪切载荷作用下,界面破坏是导致面外破坏的首要因素。缝经纱的强度影响着界面脱黏后的承载能力。此外, Li等学者^[72]基于获得的损伤机理讨论了编织角对三维机织复合材料面外拉伸强度和剪切强度的影响。而后,李志兴^[74]将基于同步辐射CT损伤分析方法推广到三维机织复合材料在面外拉-拉疲劳载荷作用下的损伤分析中,研究了材料在面外拉-拉疲劳失效各阶段的损伤机理。

Na等学者^[75]在机织复合材料的基体中分散碳纳米管传感器,采用原位CT检测方法,观察了机织复合材料在变形过程中的内部结构。对机织复合材料在单

图 9 (网络版彩图)基于同步辐射CT的原位试验示意图^[72]

Figure 9 (Color online) Schematic diagram of the synchrotron radiation CT based *in situ* test [72].

图 10 (网络版彩图)面外拉伸试验过程中部分损伤形貌CT图^[72]

Figure 10 (Color online) Damage morphology CT images of through-the-thickness tension test [72].

轴和双轴载荷作用下的力学性能和压电性能进行了同步表征,发现机织复合材料的电阻随应力-应变曲线梯度的变化而变化,说明材料的电阻与机织复合材料的损伤模式相对应。这一结论在原位CT结果中得到了验证。

基于CT技术的原位检测方法可以连续、无损的获得机织复合材料的损伤演化的过程,且精度高、可视性强。但是该方法在机织复合材料损伤机理研究中尚存在一定的局限性。传统CT检测设备的空间往往比较局限,安装大载荷加载设备的难度高,所以当前的原位检测方法仅局限于小载荷试验。高精度、高加载能力的原位试验加载设备备受期待。

3 机织复合材料损伤演化模型与仿真研究进展

3.1 机织复合材料的损伤判定准则

机织复合材料损伤发展过程涉及复杂的失效机理和破坏过程。机织复合材料的失效一般分为初始损伤触发阶段和损伤演化阶段。为了实现复合材料力学性能特别是强度性能的预测,国内外学者先后提出了Hill准则^[76]、Tsai-Wu准则^[77,78]、Hoffman准则^[79]、Hashin准则^[80~83]、Puck准则^[84~86]、LaRC系列准则^[87~91]及Pinho准则^[92,93]等受到广泛关注的失效准则。这些准则主要针对单向纤维增强复合材料,并可应用

于机织复合材料中纤维束的失效判断。失效准则定义了复合材料的初始损伤触发条件。为了表征复合材料在外部载荷作用下材料性能的渐进演化过程,众多学者将连续介质损伤力学理论与失效准则相结合,建立了复合材料力学行为渐进损伤演化预测方法。损伤演化模型众多,比较有代表性的有指数演化模型^[94]、双曲正切型演化模型^[95,96]、反比例演化模型^[97]及基于等效应变的双线性演化模型^[98,99]。不同的损伤演化模型往往通过定义损伤因子随应力或应变的变化来表征材料的失效过程,损伤初始准则和损伤演化模型结合起来可以描述机织复合材料损伤发展的整个过程。

3.2 机织复合材料准静态损伤演化模型与仿真研究

早期,将渐进失效分析方法应用到复合材料研究的Talreja等人^[100~102]提出采用两个损伤因子描述材料两个主要失效方向力学性能退化的方法。计算所得层合板的失效过程与实验吻合得较好。Murakami-Ohno损伤理论^[103]是描述机织复合材料渐进损伤过程最常用的损伤力学理论。Fang等学者^[99,104,105]基于该理论提出了各向异性损伤演化本构方程。Zeng等人^[106~109]建立了三维编织复合材料的力学性能预报模型,Fang等人^[110~112]采用Murakami-Ohno损伤理论研究了三维编织复合材料的渐进损伤过程,Ge等人^[113,114]采用Matzenmiller损伤理论建立了耦合弹塑性损伤模型研究三

维编织复合材料的非线性力学行为。这些针对编织复合材料提出的损伤模型同样适用于机织复合材料性能的预测。

Nagai等学者^[115]提出一种基于细观力学单胞的有限元分析模型, 将一个大型复杂的织物结构分为各种类型的单胞, 并应用其开展机织复合材料力学性能的非线性分析。这种建模方法在机织复合材料的力学性能预测中被广泛应用。Jia等人^[116,117]建立了三维机织复合材料细观尺度的代表性单元模型(包括表面单胞和内部单胞模型), 分析了三维机织复合材料的非线性黏弹性损伤过程。

Zhong等人^[118]整合了Puck准则(针对纤维束)和抛物线屈服准则(针对基体材料)提出了一种连续介质损伤模型, 并用于预报三维机织复合材料的准静态损伤触发及演化过程。结果表明, 该模型能够预报纤维束和基体尺度下的纤维断裂、纤维间断裂及基体断裂, 如图11所示。

在此基础上, Lu等学者^[119]研究了三维机织复合材

料基体和纤维束之间的界面性能对材料拉伸载荷作用下的力学性能的影响。Lu学者^[120]还提出了一种三维机织复合材料压缩损伤模型, 并讨论了纤维扭结和初始不对齐对三维机织复合材料压缩性能的影响。此外, Zhong等人^[121]还研究了纱线波动对三维机织复合材料面内刚度和强度的影响。最近, Zheng等人^[122]结合等效位移、应力、单元特征长度和断裂韧性提出了一种新的三维机织复合材料渐进损伤模型, 并应用该模型研究了三维机织复合材料的有效性能和失效机理。三维机织复合材料内部的纤维交织结构复杂, 为了考虑材料内部真实的纤维束弯曲波动、截面扭转和尺寸变化规律等关键几何信息, 作者高还原度地重构了细观单胞模型, 如图12所示。考虑到纤维束的横向可能存在多个裂纹的情况, 采用了两个与断裂角度相关的损伤因子表征纤维束横向损伤的演化, 有效地解决了纤维束横向应力异常的问题。

Zeng等人^[108]采用了一种新型的非均匀有限元法预报了三维编织复合材料的有效模量和局部应力。将

图11 (网络版彩图)三维机织复合材料单胞在面内拉伸载荷作用下的损伤累积^[118]

Figure 11 (Color online) Damage accumulation of 3D woven composite unit cell under in-plane tension ^[118].

图 12 (网络版彩图) 三维机织材料有限元建模流程图^[122]. (a) 材料整体机织结构; (b) 单胞几何结构; (c) 纤维束有限元模型; (d) 基体有限元模型; (e) 单胞有限元模型

Figure 12 (Color online) Construction process of 3D woven composite finite element model. (a) Woven structure of the material; (b) geometrical structure of unit cell; (c) finite element model of fiber tow; (d) finite element model of matrix; (e) finite element model of unit cell.

三维四向编织复合材料的单胞划分为六面体单元。然后, 利用高斯积分点处的材料参数计算单元的刚度矩阵。最后, 由单元的刚度矩阵形成单胞的整体刚度矩阵, 进而对三维四向编织复合材料的有效弹性模量进行预报。在该工作的基础上, Liu等人^[123]提出了一种三维机织复合材料的多尺度渐进损伤方法。该方法基于材料的细观尺度几何结构通过非均匀有限元方法建立宏观的渐进损伤模型。这种方法的优点在于可以高效、准确地预测较大尺寸的三维机织复合材料的力学性能。同时, 该方法也适用于机织复合材料的疲劳和冲击损伤演化仿真研究。

近年来, 机器学习等方法正在与材料性能及损伤预报研究相结合。Liu等^[124]采用深度学习人工神经网络建立了三维机织复合材料的初始失效准则, 并将该失效准则与传统失效准则进行对比研究。发现新准则具有很高的精度和效率, 并且可以对任意组合应力作用下的初始损伤进行预报。目前, 传统机织复合材料研究方法与机器学习等新技术结合的研究成果尚少, 但无疑是一个值得探索的研究方向, 这给机织复合材料力学性能的高效预报带了新的机遇。

目前, 机织复合材料静态损伤演化仿真方法可以在多个尺度上对机织复合材料的宏细观损伤模型进行分析和预报, 大大地促进了机织复合材料在工程中的应用。但目前该方法也还存在一些不足。一方面, 损伤

演化模型中输入参数获取是一个短板。当前的大多数仿真模型中均采用单向复合材料性能作为模型中纤维束组分的输入参数。但是, RTM工艺(机织复合材料常用制备工艺)下制备等效替代的单向复合材料存在工艺稳定性差的问题。同时, 单向复合材料基础力学性能参数测试结果的准确性和稳定性还有待提高。因此模型中基本材料输入参数的可靠获取方法成为限制模型应用的瓶颈之一。另一方面, 机织复合材料的纤维和基体之间往往存在复杂界面, 这些界面对材料的力学性能有重要的影响, 当前的研究仍无法准确地获得界面损伤模型所需的所有力学性能参数, 这也是制约当前机织复合材料损伤演化仿真方法的重要因素。界面的处理同样也是机织复合材料疲劳和冲击损伤演化仿真研究的难点。

3.3 机织复合材料疲劳损伤演化仿真研究

机织复合材料早期研究表明, 纤维增强相对复合材料的疲劳性能有非常大的影响^[125]。诸多失效模式以及各种失效模式之间的复杂耦合机制使得机织复合材料疲劳失效模式及寿命预报变得困难。一些重要研究工作^[56,126-128]主要采用实验方法对机织复合材料的性能进行研究。机织复合材料疲劳损伤演化仿真方面的研究工作相对较少。

Khan等人^[129]建立了基于疲劳载荷作用下的刚度

退化的理论分析模型, 对平纹机织铺层复合材料疲劳性能进行研究, 见图13。结果表明损伤扩展速率是刚度退化速率的函数。三种不同铺层的平纹机织复合材料试验结果与该模型的分析结果具有很好的一致性。

Huang^[130]建立了桥联细观力学模型, 预报了平纹机织复合材料在多轴疲劳载荷作用下的疲劳寿命和S-N曲线。该模型需要机织复合材料中纤维和基体的疲劳性能参数以及纤维组分含量作为输入, 来完成对机织复合材料性能的预报。Van Paepegem等人^[131]通过位移控制模式的疲劳试验获得了机织复合材料的损伤模式和刚度退化的数据, 基于这些试验结果建立了机织复合材料损伤失效模型, 并在商业软件平台对疲劳损伤过程进行模拟。该模型所预报的刚度退化、损伤扩展及损伤分布与试验结果吻合得较好。Hochard等人^[132,133]建立了一种非线性损伤累积模型用于预报机织复合材料的疲劳损伤行为, 见图14。该模型用两层虚拟的经向和纬向正交单向铺层来替代平纹织物层。其中, 两个虚拟单向复合材料层采用连续损伤方法和纤维非局部断裂失效准则, 通过有限元方法预报机织复合材料的疲劳性能, 这样就可以将模型的适用范围从单向复合材料扩展到平纹机织复合材料。

Li^[134]利用细观力学方法预测了二维机织陶瓷基复合材料在室温和高温下的疲劳寿命。他们采用剪滞模型描述纤维损伤的微观应力场, 采用随机基体多裂纹模型和断裂力学界面脱黏准则确定了基体裂纹间距和界面脱黏长度, 采用界面剪切应力、纤维强度退化模型和氧化区扩展模型, 分析了界面摩擦滑移和氧气在基体复合裂纹内扩散对复合材料疲劳寿命的影响。

Chen等人^[135]研究了平纹机织复合材料在随机疲劳载荷作用下的剩余强度和失效概率。在恒幅残差模型和试验获得的S-N曲线基础上, 提出基于随机疲劳载荷作用过程中应力峰值密度函数和功率谱密度的新

图13 碳-碳平纹机织层合板复合材料的试验疲劳寿命和预报疲劳寿命对比图^[129]

Figure 13 Compare between the tested and predicted fatigue life of carbon/carbon plain weave laminate^[129].

疲劳寿命预测模型。该模型预报结果与试验结果吻合得较好。

Xu等人^[136]提出一种细观尺度(单胞)的有限元方法, 用于预报平纹机织复合材料拉-拉疲劳损伤, 见图15。该模型采用单向复合材料的疲劳S-N曲线作为输入参数, 同时考虑了基体主导的多轴疲劳和纤维主导的疲劳损伤。通过数值均匀化的方法得到材料在疲劳未破坏及破坏后的平均力学性能。预报结果与两种组分性能一致但机织参数不同的平纹机织复合材料疲劳试验结果相吻合。该模型所需的输入参数能通过试验直接测得, 所以可以用于开展不同类型机织复合材料的疲劳性能预测。

机织复合材料疲劳损伤演化仿真的研究成果多针对二维机织复合材料, 三维机织复合材料疲劳损伤演化方面的仿真成果较少。这也从侧面表明机织复合

图14 (网络版彩图)Hochard所提模型的示意图^[133]

Figure 14 (Color online) Schematic diagram of the model proposed by Hochard^[133].

图 15 (网络版彩图)疲劳算法框图^[136]Figure 15 (Color online) Flow chart of fatigue algorithm ^[136].

材料疲劳损伤演化仿真分析的难度很大. 随着三维机织复合材料在实际工程中应用日益增多, 急需开展这方面的研究工作.

3.4 机织复合材料冲击损伤演化仿真研究

机织复合材料的冲击力学性能预测一直是研究者们关注的焦点. 其中, 机织复合材料的动态力学性能预测和抗侵彻性能预测又是其中最受关注的两类问题. 国内的顾伯洪^[4]团队在纺织复合材料冲击等领域开展了比较系统的研究工作.

在机织复合材料动态力学性能的有限元仿真分析中, 研究者们通常建立全尺寸细观模型(区分纱线和基体)进行有限元分析. Pankow等人^[137]和Zhang等人^[138,139]采用该方法研究了多种机织复合材料的动态力学性能, 见图16. 通过有限元仿真获得了试样在加载过程中的变形、失效、能量变化和损伤形貌. 在机织复合材料抗侵彻性能的有限元仿真分析中, 由于研究对象具有较大的尺寸, 因此几何模型的选择就需要综合考虑仿真模型的精度和效率. 体现机织复合材料细观结构的全尺寸模型是一种较为常见的选择. 首先确定机织复合材料的纱线结构, 主要包括纱线的截面形

状、纱线路径等特征信息; 而后对特征信息简化并建立织物单胞几何模型(即代表性体积单元). 在此基础上, 对代表性体积单元重复排列, 即可获得尺寸较大的机织复合材料平板的几何模型. 从而实现在尺寸较大的整个区域中区分出纱线和基体的建模目标. Turner等人^[140,141]采用基于细观结构的全尺寸建模方法建立了两种Z向纱线密度的不同平板模型, 并研究其冲击损伤演化行为, 见图17. Zhao等人^[142]基于多尺度方法, 建立了一种二维三轴编织复合材料平板模型. 该模型从三个尺度分别建模, 如图18所示, 实现了单纤维-纤维束-单胞-平板的逐步分析, 在此基础上研究了材料的冲击损伤行为.

除了上述的细观建模方法以外, 还有一些宏观观的建模方法, 这些方法在宏观建模的同时兼顾了细观结构及其性能的影响. 仲苏洋^[143]采用非均匀有限元方法, 建立了一种三维机织复合材料平板冲击有限元模型, 见图19. 这种模型采用宏观手段建立有限元网格, 但是在有限元计算过程中, 通过单元的位置来区分其材料属性, 从而实现在宏观网格中区分出了机织复合材料各组份材料的目的. 张超^[144]基于一种单胞平均化的思想^[145], 建立了三维编织复合材料宏观模型. 该模

图 16 (网络版彩图)三维机织复合材料分离式霍普金森压杆(SHPB)测试的细观有限元模型^[137]
Figure 16 (Color online) Micro-scale finite element model of SHPB test of 3D woven composite [137].

图 17 (网络版彩图)基于细观结构的三维机织复合材料平板的有限元模型^[141]
Figure 17 (Color online) Micro-scale finite element model of 3D woven composite plate [141].

型在确定材料面单胞、内单胞、角单胞结构力学性能基础上,通过平均化方法得到各个单胞的等效性能,并在宏观平板范围内划分相应单胞的区域以赋予等效性能,从而建立平板的宏观抗侵彻模型。

在冲击相关问题的研究中,应当采用动态本构模型来描述材料的本构关系,即在本构模型中考虑材料性能的应变率相关性^[146-150]。

有限元软件LS-DYNA中,开发者内嵌了一种针对平纹机织复合材料的动态本构模型^[151],其强度、模量的应变率效应分别表示为公式(4)和(5),式中, $\{S_{RT}\}$,

$\{S_0\}$, $\{E_{RT}\}$, $\{E_0\}$ 分别是材料的动态强度、静态强度、动态模量、静态模量; $\dot{\epsilon}_0$ 是静态参考应变率, C_{rate} 是应变率常数。

此外, ZWT本构模型^[152]也是一种常用的描述聚合物基复合材料力学响应的模型,该模型在本构方程中引入了应变率以表示材料的非线性行为,表示为公式(6)。

$$\{S_{RT}\} = \{S_0\} \left(1 + C_{rate} \ln \frac{\{\dot{\epsilon}\}}{\dot{\epsilon}_0} \right), \quad (4)$$

$$\{E_{RT}\} = \{E_0\} \left(1 + C_{rate} \ln \frac{\{\dot{\epsilon}\}}{\dot{\epsilon}_0} \right), \quad (5)$$

$$\sigma = E_0 \epsilon + \alpha \epsilon^2 + \beta \epsilon^3 + E_1 \int_0^t \dot{\epsilon} \exp \left(-\frac{t-\tau}{\theta_1} \right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\epsilon} \exp \left(-\frac{t-\tau}{\theta_2} \right) d\tau, \quad (6)$$

式中, E_0 , α 和 β 是材料的弹性常数,两个积分式分别表示材料在低应变率、高应变率下的黏弹性响应, E_1 , θ_1 和 E_2 , θ_2 分别是相应的弹性常数和松弛时间。沈玲燕^[153]采用该模型确定了一种三维正交机织玻璃纤维复合材料的动态应力-应变关系。

对于小尺寸的SHPB模型,通常可以选择细观模型来完成。但是在尺寸较大的平板冲击问题中,为了平衡计算能力和模型精度,偏宏观的模型成为更常见的选择。但是,宏观模型又无法准确描述机织结构在冲击载荷作用下的失效机理。因此,发展高效的多尺度分析模型是解决这一难题的重要途径。此外,界面在冲击载荷作用下的损伤行为也是影响模型精度的关键因素和研究难点。

图 18 (网络版彩图)多尺度模型框架图^[142]

Figure 18 (Color online) Schematic diagram of multi-scale model^[142].

图 19 (网络版彩图)基于非均匀有限元方法的三维机织复合材料平板冲击有限元模型^[143]

Figure 19 (Color online) Finite element model of 3D woven composite plate under impact load using finite multiphase element method^[143].

4 总结与展望

本文通过总结和评述机织复合材料损伤演化进

展, 对机织复合材料损伤演化研究的现状和未来发展趋势总结如下。

(1) 机织复合材料复杂的损伤演化机理使得当前任何一种独立的损伤表征方法都很难全面表征其损伤机理和失效过程。通过多种损伤表征手段的集成可以实现能力的互补。为克服单一损伤表征方法的不足, 未来针对机织复合材料, 需要开展基于同步辐射CT等先进损伤观测手段并整合多信息损伤识别技术的原位损伤演化测试方法研究。同时, 还需要开展损伤演化快速精准在线检测原理与技术研究。其意义在于通过多种损伤表征手段的集成, 能够实现三维机织复合材料损伤机理和失效过程的全面表征。

(2) 当前细观尺度复合材料损伤演化分析仍面临很多基础科学问题, 比如与整体机织材料相同制备条件下的树脂、单纤维、纤维束和界面的静动态力学参数、疲劳退化参数的测试方法研究。基于原位取样的材料性能测试方法以及微观尺度下纤维丝和界面的力学性能测试为解决上述问题提供了新的思路。这些基础问题的解决将极大地推动机织复合材料损伤演化分析方法的发展和完善。

(3) 当前的宏细观损伤强度准则(纤维束和界面的静动态损伤模型)不能充分地反映三维机织复合材料在各种复杂工况下的损伤机理, 因此开展机织复合材料的宏细观强度准则及强度设计方法研究, 将为机织复合材料的进一步广泛应用提供强有力的基础支撑。

(4) 在各种复杂条件下(湿热环境、盐雾环境、复杂应力环境), 国家重大工程领域的机织复合材料及结构面临着使役性能变化的问题, 给机织复合材料力学性能的基础和应用研究提出了新的挑战。数字孪生概

念和基于全寿命周期的力学性能预报理念为这一问题的解决提供了新思路。

(5) 机器学习算法的发展, 使得一体化分析多种类型数据(包括图像)成为可能, 将机器学习算法与有限元等仿真方法相结合, 发展高效、准确、智能的机织复合材料损伤演化仿真算法和模型, 能够实现时间成本和物质成本的显著降低, 以及设计质量的显著提高, 从而极大地推动机织复合材料的损伤评价及优化设计。

致谢 感谢上海同步辐射光源的支持。

参考文献

- 1 Xiong D B. Introduction to aviation composites of the United States (in Chinese). J Mater Eng, 1984, 3: 45–49 [熊大爻. 美国航空复合材料简介. 材料工程, 1984, 3: 45–49]
- 2 Kaw A. Mechanics of Composite Materials. Boca Raton: CRC Press, 2006. 1–16
- 3 Gibson R F. Principles of Composite Material Mechanics. Boca Raton: CRC Press, 2016. 1–5
- 4 Gu B H, Sun B Z. Impact Dynamics of Textile Composites (in Chinese). Beijing: Science Press, 2012 [顾伯洪, 孙宝忠. 纺织结构复合材料冲击动力学. 北京: 科学出版社, 2012]
- 5 Tong L, Mouritz A P, Bannister M K. 3D Fiber Reinforced Polymer Composites. Oxford: Elsevier, 2002. 7–10
- 6 Gereke T, Cherif C. A review of numerical models for 3D woven composite reinforcements. [Composite Struct](#), 2019, 209: 60–66
- 7 Jiang Z X, Geng L, Huang Y D. Fabrication of superhydrophobic 3-D braided carbon fiber fabric boat. Materials Letters, 2010, 64: 2441–2443
- 8 Limmer L, Weissenbach G, Brown D, et al. The potential of 3-D woven composites exemplified in a composite component for a lower-leg prosthesis. [Compos Part A-Appl Sci Manufact](#), 1996, 27: 271–277
- 9 Müller J, Zulliger A, Dorn M. Economic production of composite beams with 3D fabric tapes. Textile Month, 1994, 9: 9–13
- 10 Li J. Technology innovations of LEAP-X (in Chinese). Aeron Sci Tech, 2011, 4: 12–14 [李杰. LEAP-X发动机的创新性技术. 航空科学技术, 2011, 4: 12–14]
- 11 Li J, Ju Y B. Application and development of composite materials for GE new generation civil aero-engines (in Chinese). In: Proceedings of the 17th National Conference on Composite Materials. Beijing: China Academic Journal Electronic Publishing House, 2010. 1272–1276 [李杰, 巨亚斌. 复合材料在GE新一代商用发动机上的成功应用与发展. 见: 第17届全国复合材料学术会议. 北京: 中国学术期刊电子出版社, 2010. 1272–1276]
- 12 Lomov S V, Ivanov D S, Truong T C, et al. Experimental methodology of study of damage initiation and development in textile composites in uniaxial tensile test. [Compos Sci Tech](#), 2008, 68: 2340–2349
- 13 Rudov-Clark S, Mouritz A P. Tensile fatigue properties of a 3D orthogonal woven composite. [Compos Part A-Appl Sci Manufact](#), 2008, 39: 1018–1024
- 14 Luo Y, Lv L, Sun B, et al. Transverse impact behavior and energy absorption of three-dimensional orthogonal hybrid woven composites. [Composite Struct](#), 2007, 81: 202–209
- 15 Pan B, Yu L, Yang Y, et al. Full-field transient 3D deformation measurement of 3D braided composite panels during ballistic impact using single-camera high-speed stereo-digital image correlation. [Composite Struct](#), 2016, 157: 25–32
- 16 Pankowa M, Justusson B, Riosbaas M, et al. Effect of fiber architecture on tensile fracture of 3D woven textile composites. Composite Structures, 2019, 225: 14
- 17 Naik N K. Woven-fibre thermoset composites. In: Fatigue in Composites. Cambridge: Woodhead Publishing, 2003. 296–313

- 18 Yu B, Bradley R S, Soutis C, et al. 2D and 3D imaging of fatigue failure mechanisms of 3D woven composites. *Compos Part A-Appl Sci Manufacturing*, 2015, 77: 37–49
- 19 Potluri P, Hogg P, Arshad M, et al. Influence of fibre architecture on impact damage tolerance in 3D woven composites. *Appl Compos Mater*, 2012, 19: 799–812
- 20 Lomov S, Ivanov D, Verpoest I, et al. Meso-FE modelling of textile composites: Road map, data flow and algorithms. *Compos Sci Tech*, 2007, 67: 1870–1891
- 21 Sevenois R D B, Van Paepegem W. Fatigue damage modeling techniques for textile composites: Review and comparison with unidirectional composite modeling techniques. *Appl Mech Rev*, 2015, 67: 021401
- 22 Naik N K, Shirao P, Reddy B C K. Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation. *Int J Impact Eng*, 2006, 32: 1521–1552
- 23 ASTM D3039/D3039M-14. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. West Conshohocken: ASTM International, 2014
- 24 ASTM D5379/D5379M-12. Standard test method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method. West Conshohocken: ASTM International, 2012
- 25 Arif M F, Saintier N, Meraghni F, et al. Multiscale fatigue damage characterization in short glass fiber reinforced polyamide-66. *Compos Part B-Eng*, 2014, 61: 55–65
- 26 Zhao J, Zhang L, Guo L, et al. Dynamic properties and strain rate effect of 3D angle-interlock carbon/epoxy woven composites. *J Reinforced Plastics Compos*, 2017, 36: 1531–1541
- 27 ASTM D3479/D3479M-12. Standard test method for tension-tension fatigue of polymer matrix composite materials. West Conshohocken: ASTM International, 2012
- 28 de Vasconcellos D S, Touchard F, Chocinski-Arnault L. Tension-tension fatigue behaviour of woven hemp fibre reinforced epoxy composite: A multi-instrumented damage analysis. *Int J Fatigue*, 2014, 59: 159–169
- 29 Jespersen K M, Zangenberg J, Lowe T, et al. Fatigue damage assessment of uni-directional non-crimp fabric reinforced polyester composite using X-ray computed tomography. *Compos Sci Tech*, 2016, 136: 94–103
- 30 Daggumati S, De Baere I, Van Paepegem W, et al. Fatigue and post-fatigue stress-strain analysis of a 5-harness satin weave carbon fibre reinforced composite. *Compos Sci Tech*, 2013, 74: 20–27
- 31 Xu J, Lomov S V, Verpoest I, et al. A comparative study of twill weave reinforced composites under tension-tension fatigue loading: Experiments and meso-modelling. *Composite Struct*, 2016, 135: 306–315
- 32 Pan B, Qian K, Xie H, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review. *Meas Sci Technol*, 2009, 20: 062001
- 33 Yang Y, Zhang L, Guo L, et al. Dynamic response and research of 3D braided carbon fiber reinforced plastics subjected to ballistic impact loading. *Composite Struct*, 2018, 206: 578–587
- 34 Bay B K, Smith T S, Fyhrie D P, et al. Digital volume correlation: Three-dimensional strain mapping using X-ray tomography. *Exp Mech*, 1999, 39: 217–226
- 35 Smith T S, Bay B K, Rashid M M. Digital volume correlation including rotational degrees of freedom during minimization. *Exp Mech*, 2002, 42: 272–278
- 36 Mao L, Chiang F. Interior strain analysis of a woven composite beam using X-ray computed tomography and digital volumetric speckle photography. *Composite Struct*, 2015, 134: 782–788
- 37 Daggumati S, Voet E, Van Paepegem W, et al. Local strain in a 5-harness satin weave composite under static tension: Part I—Experimental analysis. *Compos Sci Tech*, 2011, 71: 1171–1179
- 38 Kaiser J. A study of acoustic phenomena in tensile test. Dissertation for Doctoral Degree. Munich: Technische Hochschule, 1950
- 39 Harbowyer C, Morais C, Reuter W. Development of a nondestructive testing technique to determine flaw criticality. Aerojet Solid Propulsion Company, Sacramento, 1972. AFML-TR-71-218
- 40 Cole P T. Using acoustic emission (AE) to locate and identify defects in composite structures. *Composite Struct*, 1985, 3: 259–267
- 41 Berthelot J M, Rhazi J. Acoustic emission in carbon fibre composites. *Compos Sci Tech*, 1990, 37: 411–428
- 42 Morscher G N. Modal acoustic emission of damage accumulation in a woven SiC/SiC composite. *Compos Sci Tech*, 1999, 59: 687–697
- 43 Lomov S V, Bogdanovich A E, Ivanov D S, et al. A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer

- plain weave E-glass composites. Part 1: Materials, methods and principal results. [Compos Part A-Appl Sci Manufacturing](#), 2009, 40: 1134–1143
- 44 Ivanov D S, Lomov S V, Bogdanovich A E, et al. A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites. Part 2: Comprehensive experimental results. [Compos Part A-Appl Sci Manufacturing](#), 2009, 40: 1144–1157
- 45 Takemura K, Fujii T. Fatigue damage and fracture of carbon fabric/epoxy composites under tension-tension loading. [JSME Int J Ser A Mech material Eng](#), 1994, 37: 472–480
- 46 Shahkhosravi N A, Yousefi J, Najafabadi M A, et al. Fatigue life reduction of GFRP composites due to delamination associated with the introduction of functional discontinuities. [Compos Part B-Eng](#), 2019, 163: 536–547
- 47 Jin L, Jin B C, Kar N, et al. Tension-tension fatigue behavior of layer-to-layer 3-D angle-interlock woven composites. [Mater Chem Phys](#), 2013, 140: 183–190
- 48 Woo S C, Kim T W. High-strain-rate impact in Kevlar-woven composites and fracture analysis using acoustic emission. [Compos Part B-Eng](#), 2014, 60: 125–136
- 49 Woo S C, Kim T W. High strain-rate failure in carbon/Kevlar hybrid woven composites via a novel SHPB-AE coupled test. [Compos Part B-Eng](#), 2016, 97: 317–328
- 50 Loutas T, Kostopoulos V. Health monitoring of carbon/carbon, woven reinforced composites. Damage assessment by using advanced signal processing techniques. Part I: Acoustic emission monitoring and damage mechanisms evolution. [Compos Sci Tech](#), 2009, 69: 265–272
- 51 Li L, Lomov S V, Yan X. Correlation of acoustic emission with optically observed damage in a glass/epoxy woven laminate under tensile loading. [Composite Struct](#), 2015, 123: 45–53
- 52 Li L, Lomov S V, Yan X, et al. Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites. [Composite Struct](#), 2014, 116: 286–299
- 53 Li L, Swolfs Y, Straumit I, et al. Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven carbon fiber/epoxy composites. [J Composite Mater](#), 2015, 50: 1921–1935
- 54 Ramasamy P, Sampathkumar S. Prediction of impact damage tolerance of drop impacted WFRP composite by artificial neural network using acoustic emission parameters. [Compos Part B-Eng](#), 2014, 60: 457–462
- 55 Gutkin R, Green C J, Vangrattanachai S, et al. On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses. [Mech Syst Signal Processing](#), 2011, 25: 1393–1407
- 56 Toubal L, Karama M, Lorrain B. Damage evolution and infrared thermography in woven composite laminates under fatigue loading. [Int J Fatigue](#), 2006, 28: 1867–1872
- 57 Reis P N B, Ferreira J A M, Richardson M O W. Fatigue damage characterization by NDT in polypropylene/glass fibre composites. [Appl Compos Mater](#), 2011, 18: 409–419
- 58 Naderi M, Kahirdeh A, Khonsari M M. Dissipated thermal energy and damage evolution of glass/epoxy using infrared thermography and acoustic emission. [Compos Part B-Eng](#), 2012, 43: 1613–1620
- 59 Naderi M, Khonsari M M. Thermodynamic analysis of fatigue failure in a composite laminate. [Mech Mater](#), 2012, 46: 113–122
- 60 Naderi M, Khonsari M M. On the role of damage energy in the fatigue degradation characterization of a composite laminate. [Compos Part B-Eng](#), 2013, 45: 528–537
- 61 Montesano J, Bougherara H, Fawaz Z. Application of infrared thermography for the characterization of damage in braided carbon fiber reinforced polymer matrix composites. [Compos Part B-Eng](#), 2014, 60: 137–143
- 62 Montesano J, Fawaz Z, Bougherara H. Non-destructive assessment of the fatigue strength and damage progression of satin woven fiber reinforced polymer matrix composites. [Compos Part B-Eng](#), 2015, 71: 122–130
- 63 Shao Y, Okubo K, Fujii T, et al. Effect of matrix properties on the fatigue damage initiation and its growth in plain woven carbon fabric vinylester composites. [Compos Sci Tech](#), 2014, 104: 125–135
- 64 Fruehmann R K, Dulieu-Barton J M, Quinn S. Assessment of fatigue damage evolution in woven composite materials using infra-red techniques. [Compos Sci Tech](#), 2010, 70: 937–946
- 65 Guo L, Liao F, Xu Y, et al. Experimental method and failure mechanisms investigation for out-of-plane shear fatigue behavior of 3D woven composites. [Int J Fatigue](#), 2020, 134, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105477
- 66 Battams G P, Dulieu-Barton J M. Data-rich characterisation of damage propagation in composite materials. [Compos Part A-Appl Sci Manufacturing](#), 2016, 91: 420–435

- 67 Yu B, Blanc R, Soutis C, et al. Evolution of damage during the fatigue of 3D woven glass-fibre reinforced composites subjected to tension-tension loading observed by time-lapse X-ray tomography. *Compos Part A-Appl Sci Manufact*, 2016, 82: 279–290
- 68 Ogi K, Okabe T, Takahashi M, et al. Experimental characterization of high-speed impact damage behavior in a three-dimensionally woven SiC/SiC composite. *Compos Part A-Appl Sci Manufact*, 2010, 41: 489–498
- 69 Cao W, Zhang J, Sun B, et al. X-ray tomography and numerical study on low-velocity impact damages of three-dimensional angle-interlock woven composites. *Composite Struct*, 2019, 230: 111525
- 70 Moffat A J, Wright P, Helfen L, et al. *In situ* synchrotron computed laminography of damage in carbon fibre-epoxy [90/0]s laminates. *Scripta Mater*, 2010, 62: 97–100
- 71 Garcea S C, Sinclair I, Spearing S M. *In situ* synchrotron tomographic evaluation of the effect of toughening strategies on fatigue micromechanisms in carbon fibre reinforced polymers. *Compos Sci Tech*, 2015, 109: 32–39
- 72 Li Z, Guo L, Zhang L, et al. *In situ* experimental investigation on the out-plane damage evolution of 3D woven carbon-fiber reinforced composites. *Compos Sci Tech*, 2018, 162: 101–109
- 73 Hu X, Wang L, Xu F, et al. *In situ* observations of fractures in short carbon fiber/epoxy composites. *Carbon*, 2014, 67: 368–376
- 74 Li Z X. Investigation on damage evolution and failure mechanism of 3D woven composites under out-of-plane loads (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 [李志兴. 面外载荷作用下三维机织复合材料损伤演化 and 失效机理研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019]
- 75 Na W J, Byun J H, Lee M G, et al. *In-situ* damage sensing of woven composites using carbon nanotube conductive networks. *Compos Part A-Appl Sci Manufacturing*, 2015, 77: 229–236
- 76 Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proc R Soc London Ser A-Math Phys Sci*, 1948, 193: 281–297
- 77 Tsai S W, Wu E M. A general theory of strength for anisotropic materials. *J Compos Mater*, 1971, 5: 58–80
- 78 Azzi V D, Tsai S W. Anisotropic strength of composites. *Exp Mech*, 1965, 5: 283–288
- 79 Hoffman O. The brittle strength of orthotropic materials. *J Compos Mater*, 1967, 1: 200–206
- 80 Hashin Z, Rotem A. A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials. *J Composite Mater*, 1973, 7: 448–464
- 81 Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites. *J Appl Mech*, 1980, 47: 329–334
- 82 Hashin Z. Cumulative damage theory for composite materials: Residual life and residual strength methods. *Compos Sci Tech*, 1985, 23: 1–19
- 83 Hashin Z. Analysis of orthogonally cracked laminates under tension. *J Appl Mech*, 1987, 54: 872–879
- 84 Puck A. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models. *Compos Sci Tech*, 1998, 58: 1045–1067
- 85 Puck A, Kopp J, Knops M. Guidelines for the determination of the parameters in Puck's action plane strength criterion. *Compos Sci Tech*, 2002, 62: 371–378
- 86 Puck A, Schürmann H. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models. *Compos Sci Tech*, 2002, 62: 1633–1662
- 87 Davila C G, Camanho P P. Failure criteria for FRP laminates in plane stress. Hampton: NASA Langley Research Center, 2003. NASA/TM-2003-212663
- 88 Davila C G, Jaunky N, Goswami S. Failure criteria for FRP laminates in plane stress. In: Proceedings of the 44th AIAA-ASME-ASCE-AHS-ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Norfolk, 2003
- 89 Pinho S, Dávila C, Camanho P, et al. Failure models and criteria for FRP under in-plane or three-dimensional stress states including shear non-linearity. Technical Paper. Aeronautics and Space, NASA Scientific and Technical Information (STI) Program Office, 2005
- 90 Pinho S, Darvizeh R, Robinson P, et al. Material and structural response of polymer-matrix fibre-reinforced composites. *J Composite Mater*, 2012, 46: 2313–2341
- 91 Pinho S, Vyas G, Robinson P. Material and structural response of polymer-matrix fibre-reinforced composites: Part B. *J Composite Mater*, 2013, 47: 679–696
- 92 Pinho S T, Iannucci L, Robinson P. Physically-based failure models and criteria for laminated fibre-reinforced composites with emphasis on fibre kinking: Part I: Development. *Compos Part A-Appl Sci Manufact*, 2006, 37: 63–73
- 93 Pinho S T, Iannucci L, Robinson P. Physically based failure models and criteria for laminated fibre-reinforced composites with emphasis on fibre kinking. Part II: FE implementation. *Compos Part A-Appl Sci Manufact*, 2006, 37: 766–777
- 94 Chang F K, Springer G S. The strengths of fiber reinforced composite bends. *J Composite Mater*, 1986, 20: 30–45

- 95 Joo S G, Hong C S, Kim C G. Free edge effect on the post failure behavior of composite laminates under tensile loading. *J Reinforced Plastics Compos*, 2001, 20: 191–221
- 96 Lee J W, Daniel I M. Progressive transverse cracking of crossply composite laminates. *J Composite Mater*, 1990, 24: 1225–1243
- 97 Tang Y, Zhou Z, Pan S, et al. Mechanical property and failure mechanism of 3D carbon-carbon braided composites bolted joints under unidirectional tensile loading. *Mater Des (1980-2015)*, 2015, 65: 243–253
- 98 Lapczyk I, Hurtado J A. Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials. *Compos Part A-Appl Sci Manufact*, 2007, 38: 2333–2341
- 99 Fang G D, Liang J, Wang B L. Progressive damage and nonlinear analysis of 3D four-directional braided composites under unidirectional tension. *Composite Struct*, 2009, 89: 126–133
- 100 Talreja R. Transverse cracking and stiffness reduction in composite laminates. *J Composite Mater*, 1985, 19: 355–375
- 101 Talreja R. A continuum-mechanics characterization of damage in composite-materials. *Proc R Soc London Ser A-Math Phys Eng Sci*, 1985, 399: 195–216
- 102 Niu K, Talreja R. Modeling of compressive failure in fiber reinforced composites. *Int J Solids Struct*, 2000, 37: 2405–2428
- 103 Murakami S. Mechanical modeling of material damage. *J Appl Mech*, 1988, 55: 280–286
- 104 Zako M, Takano N, Tsumura T. Numerical prediction of strength of notched UD laminates by analyzing the propagation of intra- and inter-laminar damage. *Mater Sci Res Int*, 1996, 2: 117–122
- 105 Zako M, Uetsuji Y, Kurashiki T. Finite element analysis of damaged woven fabric composite materials. *Compos Sci Tech*, 2003, 63: 507–516
- 106 Zeng T, Fang D, Ma L, et al. Predicting the nonlinear response and failure of 3D braided composites. *Mater Lett*, 2004, 58: 3237–3241
- 107 Zeng T, Wu L, Guo L. A finite element model for failure analysis of 3D braided composites. *Mater Sci Eng-A*, 2004, 366: 144–151
- 108 Zeng T, Wu L, Guo L. Mechanical analysis of 3D braided composites: A finite element model. *Composite Struct*, 2004, 64: 399–404
- 109 Zeng T, Wu L, Guo L, et al. A mechanical model of 3D braided composites with internal transverse crack. *J Composite Mater*, 2005, 39: 301–321
- 110 Fang G, Chen C, Meng S, et al. Mechanical analysis of three-dimensional braided composites by using realistic voxel-based model with local mesh refinement. *J Composite Mater*, 2019, 53: 475–487
- 111 Fang G, Liang J, Lu Q, et al. Investigation on the compressive properties of the three dimensional four-directional braided composites. *Composite Struct*, 2011, 93: 392–405
- 112 Fang G, Wang B, Liang J. A coupled FE-FFT multiscale method for progressive damage analysis of 3D braided composite beam under bending load. *Compos Sci Tech*, 2019, 181: 107691
- 113 Ge J, He C, Liang J, et al. A coupled elastic-plastic damage model for the mechanical behavior of three-dimensional (3D) braided composites. *Compos Sci Tech*, 2018, 157: 86–98
- 114 Zhong Y, Cheng M, Zhang X, et al. Hygrothermal durability of glass and carbon fiber reinforced composites—A comparative study. *Composite Struct*, 2019, 211: 134–143
- 115 Nagai K, Yokoyama A, Maekawa Z I, et al. Strength analysis for three-dimensional fiber reinforced composites. *Adv Perform Mater*, 1995, 2: 161–176
- 116 Jia X, Xia Z, Gu B. Nonlinear viscoelastic multi-scale repetitive unit cell model of 3D woven composites with damage evolution. *Int J Solids Struct*, 2013, 50: 3539–3554
- 117 Jia X, Xia Z, Gu B. Micro/meso-scale damage analysis of three-dimensional orthogonal woven composites based on sub-repeating unit cells. *J Strain Anal Eng Des*, 2012, 47: 313–328
- 118 Zhong S, Guo L, Liu G, et al. A continuum damage model for three-dimensional woven composites and finite element implementation. *Composite Struct*, 2015, 128: 1–9
- 119 Lu H, Guo L, Liu G, et al. Progressive damage investigation of 2.5D woven composites under quasi-static tension. *Acta Mech*, 2019, 230: 1323–1336
- 120 Lu H, Guo L, Liu G, et al. A progressive damage model for 3D woven composites under compression. *Int J Damage Mech*, 2019, 28: 857–876
- 121 Zhong S, Guo L, Liu G, et al. A random waveness model for the stiffness and strength evaluation of 3D woven composites. *Composite Struct*, 2016, 152: 1024–1032
- 122 Zheng T, Guo L, Huang J, et al. A novel mesoscopic progressive damage model for 3D angle-interlock woven composites. *Compos Sci Tech*, 2020, 185: 107894

- 123 Liu G, Zhang L, Guo L, et al. Multi-scale progressive failure simulation of 3D woven composites under uniaxial tension. *Composite Struct*, 2019, 208: 233–243
- 124 Liu X, Gasco F, Goodsell J, et al. Initial failure strength prediction of woven composites using a new yarn failure criterion constructed by deep learning. *Composite Struct*, 2019, 230: 111505
- 125 Ding Y Q, Yan Y, McIlhagger R, et al. Comparison of the fatigue behaviour of 2-D and 3-D woven fabric reinforced composites. *J Mater Processing Tech*, 1995, 55: 171–177
- 126 de Vasconcellos D S, Sarasini F, Touchard F, et al. Influence of low velocity impact on fatigue behaviour of woven hemp fibre reinforced epoxy composites. *Composites Part B-Engineering*, 2014, 66: 46–57
- 127 Kawai M, Taniguchi T. Off-axis fatigue behavior of plain weave carbon/epoxy fabric laminates at room and high temperatures and its mechanical modeling. *Compos Part A-Appl Sci Manufact*, 2006, 37: 243–256
- 128 Van Paepegem W, Degrieck J. Experimental set-up for and numerical modelling of bending fatigue experiments on plain woven glass/epoxy composites. *Composite Struct*, 2001, 51: 1–8
- 129 Khan Z, Al-Sulaiman F A, Farooqi J K, et al. Fatigue life predictions in woven carbon fabric/polyester composites based on modulus degradation. *J Reinforced Plastics Compos*, 2001, 20: 377–398
- 130 Huang Z M. Fatigue life prediction of a woven fabric composite subjected to biaxial cyclic loads. *Compos Part A-Appl Sci Manufact*, 2002, 33: 253–266
- 131 Van Paepegem W, Degrieck J. Simulating in-plane fatigue damage in woven glass fibre-reinforced composites subject to fully reversed cyclic loading. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 2004, 27: 1197–1208
- 132 Hochard C, Payan J, Bordreuil C. A progressive first ply failure model for woven ply CFRP laminates under static and fatigue loads. *Int J Fatigue*, 2006, 28: 1270–1276
- 133 Hochard C, Thollon Y. A generalized damage model for woven ply laminates under static and fatigue loading conditions. *Int J Fatigue*, 2010, 32: 158–165
- 134 Li L B. Fatigue life prediction of 2D woven ceramic-matrix composites at room and elevated temperatures. *J Materi Eng Perform*, 2017, 26: 1209–1222
- 135 Chen X, Sun Y, Wu Z, et al. An investigation on residual strength and failure probability prediction for plain weave composite under random fatigue loading. *Int J Fatigue*, 2019, 120: 267–282
- 136 Xu J, Lomov S V, Verpoest I, et al. A progressive damage model of textile composites on meso-scale using finite element method: Fatigue damage analysis. *Comput Struct*, 2015, 152: 96–112
- 137 Pankow M, Waas A M, Yen C F, et al. Modeling the response, strength and degradation of 3D woven composites subjected to high rate loading. *Composite Struct*, 2012, 94: 1590–1604
- 138 Zhang F, Liu K, Wan Y, et al. Experimental and numerical analyses of the mechanical behaviors of three-dimensional orthogonal woven composites under compressive loadings with different strain rates. *Int J Damage Mech*, 2014, 23: 636–660
- 139 Hou Y, Hu H, Sun B, et al. Strain rate effects on tensile failure of 3-D angle-interlock woven carbon fabric. *Mater Des*, 2013, 46: 857–866
- 140 Turner P, Liu T, Zeng X. Dynamic response of orthogonal three-dimensional woven carbon composite beams under soft impact. *J Appl Mech*, 2015, 82: 121008
- 141 Turner P, Liu T, Zeng X, et al. Three-dimensional woven carbon fibre polymer composite beams and plates under ballistic impact. *Composite Struct*, 2018, 185: 483–495
- 142 Zhao Z, Dang H, Liu P, et al. On the impact failure behavior of triaxially braided composites subjected to metallic plate projectile. *Compos Part B-Eng*, 2020, 186: 107816
- 143 Zhong S Y. Investigation of damage evolution and failure of the three-dimensional woven composites (in Chinese). Dissertation for Dcotoral Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 [仲苏洋. 三维机织复合材料损伤演化与失效行为研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015]
- 144 Zhang C. Research on macro-meso-mechanical properties and high velocity impact damage of 3D multi-directional braided composites (in Chinese). Dissertation for Dcotoral Degree. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013 [张超. 三维多向编织复合材料宏观力学性能及高速冲击损伤研究. 博士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2013]
- 145 Fang G D. Progressive damage and failure analysis of 3D four-step carbon/epoxy braided composites (in Chinese). Dissertation for Dcotoral

- Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010 [方国东. 三维四向碳/环氧编织复合材料积累损伤及失效分析. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010]
- 146 Xin S H, Wen H M. A progressive damage model for fiber reinforced plastic composites subjected to impact loading. *Int J Impact Eng*, 2015, 75: 40–52
- 147 Xin S H, Wen H M. Numerical study on the perforation of fiber reinforced plastic laminates struck by high velocity projectiles. *J Strain Anal Eng Des*, 2012, 47: 513–523
- 148 Tan V B C, Zeng X S, Shim V P W. Characterization and constitutive modeling of aramid fibers at high strain rates. *Int J Impact Eng*, 2008, 35: 1303–1313
- 149 Shim V P W, Lim C T, Foo K J. Dynamic mechanical properties of fabric armour. *Int J Impact Eng*, 2001, 25: 1–15
- 150 Lim C T, Shim V P W, Ng Y H. Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor. *Int J Impact Eng*, 2003, 28: 13–31
- 151 LS-DYNA Theory Manual. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2006. 21–22
- 152 Zhu Z X, Xu D B, Wang L L. Thermoviscoelastic constitutive equation and time-temperature equivalence of epoxy resin at high strain rates (in Chinese). *J Ningbo Univ (Sci Eng)*, 1988, 1: 58–68 [朱兆祥, 徐大本, 王礼立. 环氧树脂在高应变率下的热粘弹性本构方程和时温等效性. 宁波大学学报(理工版), 1988, 1: 58–68]
- 153 Shen L Y. Research on dynamic and penetration properties of the three-dimensional orthogonal woven glass fiber composites (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013 [沈玲燕. 三维正交机织玻璃纤维复合材料动态性能和抗侵彻规律研究. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2013]

Research progress in damage evolution of woven composites

GUO LiCheng, LIAO Feng, LI ZhiXing, HUANG JinZhao, ZHAO JiuZhou & ZHENG Tao

Department of Astronautic Science and Mechanics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Woven composites have better integrity and anti-delamination properties than laminates, due to the interlaced yarns in the woven structures. However, these structural characteristics lead to a more complex failure mechanism, which brings great challenges to the damage evolution studies of woven composites. In this paper, the research status of damage evolution of woven composites is summarized and reviewed from the aspects of experimental techniques, damage evolution model and simulation. In terms of experimental techniques, the methods to characterize the damage evolution of woven composites are summarized emphatically, including the damage characterization based on strain, acoustic emission, infrared characteristics and computed tomography (CT). The application conditions, problems and challenges of these methods are reviewed briefly. In terms of damage evolution models and numerical simulations, the typical research methods for woven composites under quasi-static load, fatigue and impact load are summarized considering the loading characteristics. On the basis of the above summaries, the future research trends of damage evolution of woven composites are put forward, including the multi-means integrated characterization of damage mechanisms, damage related tests of macro and meso basic mechanical properties, macro and meso strength criterion and strength design, simulation models combining machine learning algorithm and finite element method or more, service performance studies based on digital twin and whole life cycle under complex circumstances, etc.

woven composites, damage characterization, damage mechanism, damage evolution models and simulation, experimental techniques

doi: [10.1360/SST-2020-0123](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0123)