纤维增强复合材料层合结构虚拟 试验技术



庄福建^{1,2},陈普会^{1,*}

1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016
 2. 沈阳飞机设计研究所 扬州协同创新研究院有限公司, 江苏 扬州 225000

摘 要:本文围绕连续纤维增强复合材料层合结构虚拟试验技术,从失效机理与力学特性、失效分析模型和模型的校验与验证三个方面阐述相关研究进展,并指出未来的发展方向,其中重点关注了试样级和元件级典型结构的失效机理及其对应的 介观尺度失效分析模型的研究。

关键词:复合材料,虚拟试验,结构失效,有限元分析,层合板

中图分类号:V214.8

文献标识码:A

纤维增强复合材料因其较高的比强度/比刚度、优良的 抗疲劳特性和灵活的可设计性等优点,作为结构材料被广 泛应用于航空航天、风电、船舶、汽车和轨道交通等领域。 相对于各向同性的金属材料,复合材料固有的复杂性(各向 异性、多相性、多界面、多尺度性等)使得传统的设计分析方 法很难适用于复合材料结构的设计,极大地增加了复合材 料应用的难度。迄今为止,复合材料结构的设计与认证依 然依赖于大量耗时且昂贵的物理试验,但随着各个尺度先 进分析模型的发展和高性能计算设备的普及,基于高保真 度数值仿真的虚拟试验有望在不久的将来在多个试验层级 上替代相当多的物理试验,从而加快产品的设计迭代,节省 大量的研发成本。美国国家航空航天局于2018年发布的 "愿景2040"[1]战略研究结果中强调了基于模型的产品研发 体系在未来的重要性,明确了美国到2040年形成集成式多 尺度的材料和承力系统建模与仿真生态系统的发展目标 (见图1),其虚拟试验的范围更是涉及材料与结构的设计、 优化、制造与认证等环节。

为构建可靠的复合材料结构在各种载荷工况下(静力、疲 劳、冲击、振动、湿热等)的变形与破坏的虚拟试验体系,需要做 到以下三点:(1)清楚材料和结构破坏的详细物理过程;(2)在

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2019.10.001

数值模型中,对三维应力状态下材料的本构关系和变形及运动规律,以及边界条件进行恰当的表征;(3)对所构建的计算工具进行系统严谨的校验与验证 (Verification and Validation, V&V^[2-4])。作为后两部分的基础,第一部分随着测量与检测技术的不断进步^[5,6]变得愈加容易实现,人们对于复合材料多空间/时间尺度的力学行为有了更为深刻的认识。第二部分是最复杂且最具挑战性的,但在近几十年内大量研究人员的努力下,也有了长足的发展^[7-10]。第三部分则最终通过检验数值仿真的自治性及其与物理试验的一致性,建立起数值模型理论发展与工程应用的桥梁,其框架可采用积木式验证体系,依次涵盖试样级、元件级、组件级、部件级和全尺寸级试验。

本文围绕连续纤维增强复合材料层合结构虚拟试验技术,从失效机理与力学特性、失效分析模型和模型的校验与验证三个方面阐述相关研究进展,并对未来的发展方向提出建议,其中重点关注试样级和元件级典型结构的失效机 理及对应的介观尺度失效分析模型的研究。

1 纤维增强复合材料层合结构失效机理与力 学特性

自20世纪60年代纤维增强复合材料的逐步应用以

收稿日期:2019-07-02; 退修日期:2019-07-15; 录用日期:2019-09-10 基金项目:国家自然科学基金(11572152);国家留学基金(201706830020);江苏高校优势学科建设工程

*通信作者:Tel.: 13813988209 E-mail: phchen@nuaa.edu.cn

引用格式: Zhuang Fujian, Chen Puhui. Virtual testing of fiber reinforced composite laminated structures [J]. Aeronautical Science & Technology,2019,30(10):1-15. 庄福建,陈普会. 纤维增强复合材料层合结构虚拟试验技术[J]. 航空科学技术,2019,30(10):1-15.



图 1 集成式计算材料工程 Fig. 1 Integrated computational materials engineering

来,人们对复合材料层合板失效机理进行了大量的研究, 但不同的研究者对于失效机理的表述并不完全相同,本节 对纤维增强复合材料层合板多尺度失效机理进行梳理,并 采用统一的表述对典型结构在典型载荷下的典型宏观失 效模式中的介观失效模式构成进行整理,以形成对复合材 料层合结构失效机理的全面系统的认识,为虚拟试验技术 中的核心环节——失效分析模型的构建奠定基础。

1.1 多种空间尺度的定义

纤维增强复合材料的各向异性、多相性和多尺度性 等特点决定了其损伤与断裂行为的复杂性。如图2所示, 对复合材料及其结构的研究尺度通常分为细观尺度 (micro-scale)、介观尺度 (meso-scale) 和宏观尺度 (macroscale) 三种。细观尺度中的典型尺寸为纤维直径,此尺度 下材料分为纤维、基体和纤维基体间的界面三部分。介 观尺度中的典型尺寸为单向层 (lamina) 的厚度,此尺度下 将单向层视为一个正交各向异性均匀体;多向层合板中 各单向层通过薄薄的树脂区黏结在一起。宏观尺度中的 典型尺寸为多个单层或者整个层合板 (laminate) 的厚度, 此尺度下将多个单层或层合板视为一个均匀的各向异 性体。



图2 纤维增强复合材料及其结构研究的三种空间尺度

Fig. 2 Three space scales in research of fiber-reinforced composites and structures

1.2 不同空间尺度下的复合材料失效模式的表述

在不同空间尺度下,对复合材料多向层合板中典型失 效模式的表述也有所不同。

图3展示了不同应力状态下细观尺度上的各种失效模

式,包括:(1)基体黏塑性变形与开裂;(2)纤维-基体界面脱 黏;(3)纤维破坏(拉断或弯折)。图3(a)为介观横向拉伸失 效,图3(b)为介观横向剪切失效,图3(c)为介观纵向拉伸 失效,图3(d)为介观纵向压缩失效(纤维折曲)。细观失效 在本质上为更小尺度的裂纹萌生与扩展,按照断裂力学中 的三种断裂模式(张开型、滑剪型和撕剪型)则可以有更多 的分类(图3已列出部分情况)。

各种细观失效模式的不同组合与汇聚便形成了不同的

介观失效模式,如图4所示,包括:(1)纤维主导的纵向拉伸 和纵向压缩(纤维折曲)失效;(2)基体主导的横向拉伸失 效、横向剪切失效和纵向剪切失效(介观基体裂纹);(3)相 邻异向铺层间的层间失效(分层)。



图3 纤维增强复合材料典型细观失效模式 Fig. 3 Typical micro-scale failure modes of fiber reinforced composites







纵向拉伸失效包含了细观上的基体开裂、纤维-基体界面 脱黏(此情况下又称纤维拉脱)和纤维拉断。纵向压缩失效包 含了细观上的基体开裂、纤维-基体界面脱黏和纤维弯折。横 向失效则包括纤维间的细观基体开裂和纤维-基体界面脱黏。 分层失效包括细观上的层间树脂区的基体开裂和树脂区基 体,与相邻层中纤维的界面脱黏以及可能的纤维桥联。 当累积了足够多的介观失效后,结构中便出现了明显 可见的宏观裂纹;随着载荷的进一步增加,宏观裂纹继续扩 展,当其发生非稳定扩展时,结构便发生灾难性的整体破 坏。不同的复合材料结构分别有对应的宏观失效模式分 类。本文1.4节中将对典型结构在典型载荷下的典型宏观 失效及其中的介观失效模式构成进行详细介绍。

1.3 介观尺度损伤扩展与交互耦合

介观尺度作为连接细观与宏观的桥梁,是目前较为适合 复合材料多向层合板结构失效研究的尺度。对其损伤起始、 扩展与交互耦合的理解有助于相关尺度模型的合理构建。

由于连续纤维增强复合材料特有的细观构造和多向层 合板的结构特征,介观尺度的损伤起始后,会按照各自不同 的路径进行扩展:(1)纵向拉伸损伤一般沿垂直纤维方向扩



(a)面外冲击

展;(2)纵向压缩损伤沿与纤维方向呈一定角度的方向扩展;(3)横向拉伸和横/纵向剪切均沿着平行于纤维方向的断裂面扩展;(4)分层损伤则沿着层间界面扩展。

然而,在多向层合板中,各模式损伤的扩展并不是独立 的,它们会发生一定程度上的交互耦合(相互竞争和相互促 进并存),从而影响整体结构的力学响应。因为损伤的出现 意味着局部材料的刚度退化,这会在结构的内部引起应力 的集中和重新分配,从而影响其他模式损伤的萌生与演化。 图5展示了复合材料多向层合板在销钉挤压^[11,12]和面外冲 击^[13]载荷下损伤交互耦合的例子。值得注意的是,这同时 也说明了各种模式损伤的起始并不都是由较为均匀的内部 应力状态达到临界值所引起的,还有可能是其他模式损伤 的扩展所触发的。



(b) 销钉挤压

图5 复合材料多向层合板的介观损伤交互耦合 Fig.5 Interaction of meso-scale damage in multi-directional composite laminates

1.4 典型复合材料结构的失效机理

无论复合材料结构的失效问题如何复杂,均可由典型 结构在典型载荷下的典型失效模式的组合来描述。所以, 对于典型结构在典型载荷下的失效机理的研究,有助于分 析复杂的实际工程问题以及相应分析模型的建立。本节将 基于以往研究,总结典型复合材料结构(试样级和元件级) 在不同宏观失效模式下的介观失效模式组成,包括开孔拉/ 压失效、层合板面外低速冲击和冲击后压缩失效以及机械 连接结构失效。

(1) 复合材料开孔结构拉/压失效

开孔结构在拉伸载荷下的主要介观失效模式包括:基 体主导的横向拉伸和纵向剪切失效、层间分层失效和纤维 主导的纵向拉伸失效。开孔结构在压缩载荷下的主要介观 失效模式包括:基体主导的横向剪切(主要由宏观的横向压 缩触发)和纵向剪切失效、层间分层和纤维主导的纵向压缩 失效。其中,各模式的介观失效占比由层合板铺层比例和 顺序、单层厚度以及几何尺寸决定^[14]。

(2)复合材料层合板面外低速冲击和冲击后压缩失效

层合板在面外低速冲击下的介观失效模式包括基体主导的横向拉伸和横向剪切失效、层间分层(多为花生状)和少量的纤维主导的纵向压缩和拉伸失效。层合板冲击后压缩失效中的主要介观失效模式包括层间分层、纤维主导的纵向压缩和基体主导的横/纵向剪切失效。其中各式介观失效占比由单层厚度、铺层比例和顺序和几何尺寸决定^[13,15]。

(3) 复合材料机械连接结构失效

不同设计参数下(构型、铺层和几何尺寸等)的复合材料 机械连接结构具有复杂多样的宏观失效模式,典型的被连接 板破坏包括净截面拉伸/压缩失效、挤压失效、剪切失效、剪豁 失效和拉脱失效,此外还有紧固件的破坏。净截面拉伸/压缩 失效中的介观失效模式与开孔拉伸/压缩失效中的介观失效 模式组成类似,但宏观裂纹面位置略有不同;挤压失效模式较为复杂,包括了所有可能的介观失效模式,即纤维主导的纵向拉压失效(但压缩为主导模式)、基体主导的纵向剪切与横向前切或者纵向剪切与横向拉伸的混合失效以及层间分层^[16]。其中,基体裂纹的断裂面角度较其他情况更为多样; 剪切失效模式包括介观的纤维主导纵向拉伸失效、基体主导的纵向剪切失效和层间分层;剪豁失效模式包括介观的纤维主导纵向拉伸失效、基体主导的线向剪切失效和层间分层;剪豁失效模式包括介观的纤维 主导纵向拉伸失效、基体主导的横向拉伸失效和层间分层^[16]; 拉脱失效模式与面外低速冲击下的介观失效模式组成具有一 定的相似性,同样包括基体主导的横向拉伸和横向剪切失效、 层间分层和少量的纤维主导的纵向压缩和拉伸失效。

1.5 复合材料的准脆性及其结构失效的尺寸效应

虽然在实际工程应用中,大部分的复合材料结构呈现 出脆性破坏的特点(直到失效前的载荷一位移曲线依然为 线性),但这只是结构在宏观尺度上的表现,若以此为依据, 采用单纯的基于应力或应变的失效判据,并结合由单向板 测得的材料基本强度来预测结构的整体失效,在某些尺度 范围下则会产生与试验偏离较大的结果。

大量的试验研究^[17-20]表明,不论是无缺口或损伤的复合 材料结构,还是含有缺口、损伤或明显缺陷的复合材料结构, 在保持几何相似的情况下,其名义强度会在一定尺度范围内 依赖于其几何尺寸的大小,这就是著名的尺寸效应(size effect)。无损件的尺寸效应可以用缺陷分布的随机性来解释, 含损伤件的尺寸效应则与材料中裂纹扩展的能量释放有关, 可以用断裂力学来解释。下面主要讨论第二种尺寸效应。

然而,单纯基于线弹性断裂力学(Linear Elastic Fracture Mechanics, LEFM)的预测结果并不总是与试验吻合的,这 是因为复合材料是一种工程结构尺度上的准脆性(quasibrittle)材料。准脆性材料是一种介于脆性材料和韧性材料 之间的一种材料分类。图6和图7分别展示了准脆性材料、 脆性材料和韧性材料在本构关系、裂纹扩展阻力曲线(Rcurve)和损伤扩展区应力分布上的区别。理论上,脆性材



图6 脆性材料、准脆性材料和韧性材料的典型性质

Fig. 6 Typical properties of brittle, quasi-brittle and ductile materials



图7 脆性材料、准脆性材料和韧性材料的"损伤"扩展区应力分布的区别

Fig. 7 Difference in the stress distribution of "damage" propagation zone in brittle, quasi-brittle and ductile materials

料在裂纹尖端的应力极大,但实际中总是存在一个很小尺度的塑性区,而其最大应力也是有限的;准脆性材料在宏观裂纹尖端存在一个"黏聚区"(Cohesive Zone, CZ),也被称为"断裂扩展区"(Fracture Process Zone, FPZ),在这样一个区域内,存在很多的细观裂纹,但因区域内的材料在宏观上未完全分离,故可以继续承担一定的载荷;塑性材料在裂纹尖端存在一个较为均匀的塑性区,塑性区内的应力大致相同。由于准脆性这种分类是有一定尺度范围的(取决于断裂扩展区长度与典型结构尺寸的比例^[21]),因而任何脆性材料在足够小的尺度上都可以算作准脆性材料^[22]。

鉴于准脆性材料的特殊性,美国著名力学家Zdeněk P. Bažant自20世纪70年代逐步提出了适用于混凝土、岩石和 纤维增强复合材料等准脆性材料的尺度律,发展出一套相 应的准脆性断裂力学^[21],其理论得到了大量的试验验证并 被广泛使用。

2 纤维增强复合材料层合结构失效分析模型

以往的大量工程实践使得研究者们针对不同的复合材 料层合结构形成了相当多的经验或半经验失效分析方法,如 用于开孔板失效分析的点应力/平均应力准则,用于机械连接 结构失效分析的强度包线法和特征曲线法等。然而这些方 法均依赖于一定量的试验数据以确定方法/模型的输入参数, 适用范围也仅限于特定铺层和几何尺寸,对于一般情况则需 要一些额外的经验性系数。自20世纪80年代后期逐渐发展 起来的渐进损伤分析方法,基于有限元分析等数值方法,结 合逐步成熟的失效理论,包括判断损伤起始的失效准则和模 拟损伤扩展的刚度退化模型或损伤模型(基于断裂力学和/或 损伤力学)。该方法只须知道相关材料属性便可进行失效预 测,具备广泛的适用性,可用于任意几何构型和尺寸、铺层比 例和顺序,以及复杂的载荷边界,因而可作为虚拟试验技术 的基础,本节对其相关研究进展进行讨论。

2.1 复合材料与结构失效预测的多尺度数值模型及其应用

正如上一节中所阐述的,由于复合材料的多相性和多 尺度特点,其损伤与断裂行为也有着显著的多尺度性。以 往的研究者们根据各自所研究问题的尺度提出了不同的模 型,模型所处领域可以从量子力学,到分子动力学,到细观 力学,再到连续介质力学及结构力学。而复合材料力学研 究领域的模型一般分为细观模型 (micro-scale model)、介观 模型 (meso-scale model) 和宏观模型 (macro-scale model) 三 种^[23,24],与1.1节中所定义的三种尺度相对应。

不同尺度的模型对材料及其结构失效过程的解析度大

不一样。细观模型^[25-27]将纤维和基体以及它们之间的界面 进行准确地建模,模型中可考虑基体的黏塑性与开裂、纤维 的破坏和界面的脱黏,因此能够很好地对复合材料细观失效 机理进行再现。图8给出了细观模型的典型应用,其中,图8 (a)为横向基体主导断裂^[28];图8(b)为纤维折曲^[26];图8(c)为 带有桥联的I型层间分层^[29]。然而目前在层合板结构失效预 测中使用细观模型的计算量是无法承受的,但细观模型有助 于深刻理解复合材料的损伤机理^[25,30],同时可采用复杂应力 状态下细观尺度的虚拟试验来验证介观失效准则^[31]和形成 介观模型输入参数(刚度、强度和断裂韧性)。细观模型还有 助于新材料的设计与优化^[32]。细观模型的输入参数可通过 细观尺度的物理试验或者更低尺度的虚拟试验获得。

介观模型[33~35]中将各单层均质化为正交各向异性材料, 忽略组分及组分间的界面,但考虑单层之间的界面,结合层 内和层间的失效准则和损伤模型,能够很好地模拟层合板结 构在各种载荷下的失效行为。目前大多数的试样级和元件 级复合材料结构失效研究均在这一尺度下进行,因而将在下 一小节中对此类模型的研究进行详细阐述。根据对裂纹的 数值表征方法可以将介观模型分为连续损伤模型 (continuum damage model) 和 离 散 损 伤 模 型 (discrete damage model)。图9给出了介观尺度模型的典型应用,其 中,图9(a)为层板压碎^[36];图9(b)为紧凑拉伸^[37];图9(c)为开 孔拉伸^[38];图9(d)为边缘冲击^[39];图9(e)为面外冲击^[40];图9 (f)为销钉挤压^[11];图9(g)为螺栓挤压^[16]。介观尺度的输入参 数可通过单向板试验或者细观尺度的虚拟试验获得:对于具 有厚度和边界约束依赖性的强度参数,如"就位强度",可通 过采用相应就位值的方法解决。在某些情况下,部分失效模 式可能对结构整体失效准确预测影响不大,如加筋壁板失效 中蒙皮和筋条内部的层间分层,为提高分析的效率,可将其 忽略,仅考虑关键的失效模式,如加筋壁板失效分析时仅考 虑筋条与蒙皮间的界面脱黏以及筋条蒙皮的层内失效。

宏观模型^[41-43]中将多个单层或者整个层合板均质化为 一种材料,采用在层合板尺度上测得的刚度、强度和断裂能 等参数进行宏观裂纹扩展的模拟(图10为典型应用:含大 开口的PRSEUS复合材料机身壁板失效分析^[42]),相对介观 模型,进一步降低计算成本,适用于部件级结构的失效预 测,但对于不同构型的层合板,其输入参数需要借助物理试 验或者更低尺度的虚拟试验来重新标定。

此外,为取得模型解析度和计算成本之间的平衡,也有 研究者将不同尺度的模型进行结合,提出了多种跨尺度模型^[44-46](图11为典型应用,其中,图11(a)为编织复合材料缺



(c)带有桥联的 I 型层间分层云 图 8 细观模型的典型应用

Fig. 8 Typical applications of micro-scale models



Fig. 9 Typical applications of meso-scale models

口件弯曲断裂分析^[46];图11(b)为高效复合材料加筋板失效 分析^[45])。跨尺度模型考虑到复合材料各尺度间的紧密联 系,在求解时用低尺度的模型来驱动更高尺度模型,不同尺 度模型间存在着单向层次的 (hierarchical) 或双向协同的 (concurrent) 信息传递,其中单向传递模型主要用于介观材 料属性的计算,而在模拟损伤扩展时有明显的局限性(均匀 化假设不再成立,并不能预测尺寸效应和断裂扩展区),而 双向传递模型虽然不存在这样的问题,但其计算量巨大^[47]。

将上述多种尺度的分析模型逐级联系起来,可以形成 自下而上 (bottom-up)^[7]和自上而下 (top-down)^[48]的两种全 过程虚拟试验体系。自下而上式强调用较低尺度的模型形成较高尺度模型的输入,包括各种刚度、强度和断裂参数, 在试验方面只须进行最低尺度的材料表征。自上而下式强 调按照实际的工程需求规划分析模型,针对关键的失效机 理,避免不必要的探索,提高整体研发效率。

2.2 介观尺度下的复合材料塑性、损伤与断裂模型及其参数表征

由于成熟的商业有限元求解器中,一般提供了几何和 边界非线性的解决方案,但并未提供很好的材料非线性模 型,所以复合材料塑性、损伤与断裂的模拟是复合材料及其 结构失效预测的核心问题。



图 10 宏观模型的典型应用

Fig. 10 Typical application of macro-scale model

介观尺度下,纤维增强复合材料在性能退化前的表观 "塑性"主要来源于基体本身的黏塑性变形、弥散的纤维-基 体脱黏(初始阶段)和可能的纤维转动,而纤维在失效前基本 呈弹性,所以在除纵向拉压外的基体主导的变形情况下,塑 性是客观存在的。在多向层合板中,因为层间界面层较薄, 复合材料的层内塑性起主导作用。损伤在这里对应于介观 尺度失效模式的渐进演化,它会引起材料点刚度的退化。当 损伤累积到一定阶段,主裂纹横跨整个材料点对应的区域, 材料点在某一或某些方向上已无法继续抵抗任何变形,此时 材料点发生断裂。塑性是一种应变硬化 (strain hardening) 行 为,而损伤是一种应变软化 (strain softening) 行为。



图 11 跨尺度模型的典型应用

Fig. 11 Typical applications of trans-scale models

对于复合材料塑性行为的研究,以往的学者大多集中 在对面内剪切非线性的研究^[49-51],近年来才逐渐提出更加 全面的(黏)塑性模型^[52,53]以考虑多轴应力状态以及静水压 力和应变率的影响。模型的类型分为基于简单应力应变关 系^[49,54]、基于各向异性(黏)塑性理论^[50,52,53]和基于损伤变 量^[51,55]三类。然而,由于塑性在工程常用铺层层合板中的 影响有限,所以在失效模型中并不是一个必须要考虑的问 题,但在正交铺层或者角铺设铺层的情况下则必须考虑。

相对于塑性行为,损伤与断裂的研究则广泛得多。断 裂可以看作是损伤的一种极限状态,而损伤的模拟实质是 对材料中不同尺度裂纹的表征。介观尺度下,复合材料多 向层合板中的裂纹主要有层内纵向纤维主导及横向基体主 导的裂纹和层间裂纹(分层)两种。

裂纹的起始和扩展可以用断裂力学的方法来模拟。当存在初始裂纹时,裂纹在外载作用下是否扩展由裂纹尖端的应变能释放率G或应力强度因子K与其临界值的对比决定。当结构中不存在初始裂纹时,则需要额外的局部失效

准则来判断裂纹的萌生。

当裂纹尖端的断裂扩展区 (FPZ) 长度远小于裂纹长度 时,裂纹的扩展可以用基于 LEFM 的方法来模拟,如采用基 于有限元的虚拟裂纹闭合技术^[56] (Virtual Crack Closure Technique, VCCT) 来计算应变能释放率,当满足能量准则 时,通过释放裂纹尖端处的重节点来模拟裂纹的扩展。 VCCT 可用于存在初始分层的层合结构中的损伤扩展模 拟;但 VCCT 需要指定分层扩展方向,并假设分层呈自相似 扩展;在分层黏聚区较大或者纤维桥联效应显著时,结果的 准确性难以保证。VCCT理论上也可以用于层合板层内裂 纹的扩展,但具有与模拟分层时一样的局限性。

当裂纹尖端的FPZ长度与裂纹长度相当时,如在诸多 包含塑性和微裂纹的准脆性材料裂纹扩展中,FPZ的力学 行为表征对裂纹扩展预测有着显著的影响。此类问题需要 采用非线性断裂力学 (Non-Linear Fracture Mechanics, NLFM) 来解决。黏聚区模型[57,58] (Cohesive Zone Model, CZM) 便是其中一种, Dugdale 和 Barenblatt 是最早提出黏 聚区模型的学者,Hillerborg等^[57]则首次将黏聚区模型应用 到有限元模型中以预测混泥土结构的强度。CZM 中假设 黏聚区内,材料点的应力水平在达到临界值(强度)之后便 不能再继续提高,而是进入应变软化阶段;此区域中材料的 黏聚力与裂纹面相对位移(位移间断)之间存在着一定的关 系,即黏聚法则 (cohesive law),或者牵引力-分离法则 (traction-separation law),它是黏聚区模型的核心。根据J 积分理论^[59]可知,这一法则所包围的面积,即黏聚能 Γ_{0} ,等 于裂纹稳态扩展下的断裂韧性G。常见的单一模式的黏聚 法则形式如图12所示。相对于线弹性断裂力学方法,CZM 无须定义初始裂纹和指定扩展方向,能够预测裂纹的萌生 和非相似性扩展,因此其不仅适用于存在尖锐初始裂纹的 情况,还适用于无初始裂纹结构和钝形缺口结构。

在数值模拟中黏聚区模型须通过定义单元本构关系来实现,具体的渐进退化行为可借助连续介质损伤力学 (Continuum Damage Mechanics, CDM)引入相关损伤变量来控制,同时可能需要引入特征长度来正则化单元的能量释放,如裂纹带模型^[60] (crack band model),或采用其他的非局部方法, 但其中的特征尺寸并不能直接测得,通常需要标定。其中,局 部连续损伤模型被广泛应用于复合材料结构的失效分析中,但 在采用有限元方法时,存在网格方向的依赖性,即损伤扩展方 向会受到网格划分的影响;此时可采用沿纤维方向划分网格的 方法以缓解这一问题,同时网格尺寸的确定需要考虑到应力分 析和断裂能释放的准确性以及黏聚区的解析度要求。



黏聚区模型可用于复合材料层合板层内和层间的裂纹 扩展模拟。常用的单元类型有零厚度或有限厚度的黏结 元[33,61]、非线性弹簧元[62]、连续实体单元[35,63]和壳单元[64,65] 等。黏结元和弹簧元是一种离散的裂纹表征方法,而实体 单元和壳单元则是一种弥散的裂纹表征方法。层间分层损 伤一般有明确的裂纹起始和扩展面,且黏聚区的厚度很小, 因此可以通过预制黏结元或弹簧元的方法进行准确的模 拟。层内基体主导横向损伤的起始位置和断裂面角度并不 能被预先确定,且其前期演化过程一般伴随着大范围的细 观弥散裂纹:同时,纤维主导的纵向损伤的起始位置和扩展 方向也不能被预先确定;所以,对于层内损伤而言,离散式 单元的应用较为困难且未必总是合理。一般在某些损伤形 式及其分布较为明确的情况下(无纤维折曲和断裂面倾斜 的横向裂纹),可合理审慎地使用离散的裂纹表证方 法[14,39,40,66];或者借助规则化的扩展有限元法 (Regularized eXtended Finite Element Method, Rx-FEM)^[37]、漂浮节点法 (Float Node Method, FNM)^[67]、增强有限元法 (Augmented Finite Element Method, A-FEM)^[68] 等先进的数值方法实现。 而在更为普遍的情况下,层内损伤的模拟一般采用内置弥 散式CZM的实体单元或壳单元。

复合材料层合板介观裂纹(损伤)的起始判定需要借助 失效准则来实现。目前常用的层内的失效准则有基于应力 不变量理论的Tsai-Wu准则^[69]、Hashin准则^[70]、Camanho准 则^[31]等和基于 Mohr-Coulomb 断裂面思想的 Puck 准则^[71]、 LaRC 准则^[72]等。常用的层间的失效准则有一次或二次名 义应力准则等。同时模拟混合模式下的层内和层间裂纹扩展也需要某种准则来计算相应的断裂韧性,常用的有幂指数准则和Benzeggagh-Kenane (B-K)准则^[73]等。

当采用黏聚区模型模拟复合材料中的介观裂纹起始与 扩展时,强度和断裂韧性相关的性能参数试验表征是非常关 键的一环。需要说明的是,这里的强度和断裂韧性实际上都 是复合材料在介观尺度下力学行为的唯象性表述。强度在 材料应力一应变曲线上所对应的点区分了介观尺度下的材 料应变硬化(或线性段)与应变软化两个阶段。断裂韧性,即 裂纹扩展阻力曲线,决定了材料软化的黏聚法则^[74,75]。

由于复合材料层合板中裂纹形式的多样性,层内横/纵向和层间均存在不同模式的裂纹及其组合,因而复合材料的性能参数表征比金属材料要复杂得多。层内横纵向的强度可以通过对应的标准试验(单向板和±45°层合板)测得,但在多向层合板中,单层的横向基体主导失效的强度会随着相邻层约束情况及其厚度的变化而变化,需要采用"就位强度"(in situ strength)^[76]。层间强度虽然也有对应的试验标准^[12],但这些方法尚存在一些值得商榷的问题^[77],所以在一般情况下,模型中的层间强度采用对应模式的横向失效的强度值或者以其为基础的折减值。

对于复合材料的断裂韧性的试验表征研究,迄今为止, 大多集中在层间分层,对于层内纤维主导和基体主导的断 裂模式研究较少[78]。层间分层的纯模式及混合模式的断裂 韧性可通过双悬臂梁试验 (Double Cantilever Beam, DCB)、 三点或四点末端缺口弯曲试验 (3 or 4 point End-notched Flexure, ENF or 4ENF) 和混合模式弯曲 (Mixed-mode Bending, MMB)等试验测得。但此类试验一般基于单向 板,实际多向层合板中的分层必然与之存在不同之处,但目 前尚在研究中。层内基体主导损伤模式的断裂韧性,鉴于 失效机理的相似性,一般假设与分层的各模式下的断裂韧 性相等,然而这一假设并不严谨[79],其相关研究也在进行 中。层内纤维主导损伤模式的断裂韧性只有在近十年相关 损伤模型提出后才开始系统性地研究,其模式分类与前两 种断裂模式有所不同。作者认为可分为纵向拉伸断裂、纵 向压缩失效和剪断纤维的面内剪切断裂;可采用的试验分 别有紧凑拉伸 (Compact Tension, CT)^[80,81] 或双边缺口拉伸 (Double Edge Notched Tension, DENT)^[82]、紧凑压缩 (Compact Compression, CC)^[80,81]或双边缺口压缩(Double Edge Notched Compression, DENC)^[83]以及修正的 Iosipescu 剪切试验[84]等。

3 失效分析模型的校验与验证(V&V)

2006年,美国机械工程师协会发布了计算固体力学校 验与验证指南^[2],其中模型的校验定义为:确认计算模型能 够准确代表相应的数学模型及其解的过程,旨在处理编程 误差和评估数值误差,包括代码校验(code verification)和 计算校验(calculation verification)两个部分;模型的验证定 义为:从模型的目标应用角度出发,确定模型在何种程度上 准确地代表了真实物理世界,旨在通过对比计算结果与试 验来评估模型的预测能力。模型的校验必须在模型的验证 之前,同时,仿真结果和试验数据必须进行相关的不确定性 评估以保证其具有参考价值。

然而以往大多数的复合材料失效分析研究中,对相应 模型的校验与验证并不全面系统,严格按照这一指南的研 究非常稀少^[4]。

模型校验方面,在成熟的商业有限元软件的基础上,对 复合材料失效分析数值模型的校验应包括:评估结构中关 键失效机理的涵盖情况;检查材料子程序的编写是否与理 论模型一致,包括刚度、塑性、强度(包线)和损伤扩展行为 等,确认建模策略(网格参数、边界条件和计算参数等)是否 合理及其变化的影响是否符合预期⁽⁴⁾。

模型验证方面,在以往的很多研究中,研究者只将宏观 力学响应(载荷—位移响应、应变和刚度信息等)与试验数 据进行对比,然而这对于发展具有高保真度、高可靠度的失 效分析模型而言是远远不够的。模型还须在不同载荷水平 下的结构内部细观/介观失效机理方面与试验相吻合。这 一方面需要综合现代化的形变测量与损伤检测技术,如数 字图像相关技术(DIC)、声发射(AE)、超声波扫描、切面显 微观测、二维X光造影以及基于三维X光的计算机断层扫 描(3D X-ray CT)等,以提供系统多维度的试验数据^[12]。另 一方面,大部分验证研究一般局限在特定的几何、铺层或载 荷边界,对于普遍的情况缺乏足够的验证。由此可见,目前 失效分析模型验证研究的广度和深度还需进一步加强。

4 结论

本文简要分析与讨论了复合材料结构虚拟试验技术的 研究进展。虽然近20年来,研究者们已取得了相当多的研 究成果,但其工作仍存在着不足。从研究现状来看,作者认 为未来的关键技术发展方向包括:多尺度高保真度的材料 行为表征方法、基于高保真度试验检测技术的失效机理数 据库构建、高效可靠准确的多尺度失效分析模型、考虑制造 缺陷的失效分析模型、高性能计算的应用研究、综合可靠的 适用于复合材料结构的模型校验与验证流程、集成式虚拟 试验技术平台的实现以及基于虚拟试验技术的数字孪生技 术的发展;此外还可进一步开展针对工艺流程的复合材料 与结构虚拟制造技术的研究。

参考文献

- Liu X, Furrer D, Kosters J, et al. Vision 2040: a roadmap for integrated, multiscale modeling and simulation of materials and systems [R]. NASA/CR-2018-219771, 2018.
- [2] Guide for verification and validation in computational solid mechanics [S]. American Society of Mechanical Engineers, 2006.
- [3] Justusson B, Schaefer J D, Liguore S L. A technical approach for assessing progressive damage and failure analysis methods for structural performance [C]// AIAA Scitech 2019 Forum: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [4] Wanthal S, Schaefer J, Justusson B, et al. Verification and validation process for progressive damage and failure analysis methods in the nasa advanced composites consortium [C]// Proceedings of the American Society for Composites, 32nd Technical Conference, 2017.
- [5] Sause M G. In situ monitoring of fiber-reinforced composites: theory, basic concepts, methods, and applications [M]. Springer International Publishing, 2016.
- [6] Garcea S C, Wang Y, Withers P J. X-ray computed tomography of polymer composites [J]. Composites Science and Technology, 2018, 156:305-319.
- [7] Llorca J, González C, Molina-Aldareguía J M, et al. Multiscale modeling of composite materials: a roadmap towards virtual testing [J]. Advanced Materials, 2011,23:5130-5147.
- [8] Van der Meer F P. Mesolevel modeling of failure in composite laminates: constitutive, kinematic and algorithmic aspects [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2012, 19: 381-425.
- [9] Rose C A, Dávila C G, Leone F A. Analysis methods for progressive damage of composite structures [R]. NASA/TM-2013-218024. NASA Langley Research Center, 2013.
- [10] Camanho P P, Hallett S R. Numerical modelling of failure in advanced composite materials [M].Woodhead Publishing, 2015.
- [11] Zhuang F, Chen P, Arteiro A, et al. Mesoscale modelling of

damage in half-hole pin bearing composite laminate specimens [J]. Composite Structures, 2019, 214:191-213.

- [12] 庄福建.复合材料层合板挤压失效预测与增强设计 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
 Zhuang Fujian. Failure prediction and enhancement design of composite laminate bearing behavior [D]. Nanjing: Nanjing
- [13] Davies GAO, Olsson R. Impact on composite structures [J]. The Aeronautical Journal, 2004,108:541-563.

University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)

- [14] Hallett S R, Green B G, Jiang W G, et al. An experimental and numerical investigation into the damage mechanisms in notched composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40:613-624.
- [15] Amacher R, Cugnoni J, Botsis J, et al. Thin ply composites: Experimental characterization and modeling of size-effects [J]. Composites Science and Technology, 2014,101:121-132.
- [16] Zhuang F, Arteiro A, Furtado C, et al. Mesoscale modelling of damage in single- and double-shear composite bolted joints [J]. Composite Structures, 2019, 226:111210.
- [17] Bažant Z P, Daniel I M, Li Z. Size Effect and Fracture Characteristics of Composite Laminates [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1996, 118:317-324.
- [18] Bažant Z P, Kim J H, Daniel I M, et al. Size effect on compression strength of fiber composites failing by kink band propagation [J]. International Journal of Fracture, 1999, 95:103.
- [19] Wisnom M R. Size effects in the testing of fibre-composite materials [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59: 1937-1957.
- [20] Green B G, Wisnom M R, Hallett S R. An experimental investigation into the tensile strength scaling of notched composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38:867-878.
- [21] Bažant Z P. Scaling theory for quasibrittle structural failure [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101:13400.
- [22] Salviato M, Chau V T, Li W, et al. Direct testing of gradual postpeak softening of fracture specimens of fiber composites stabilized by enhanced grip stiffness and mass [J]. Journal of Applied Mechanics, 2016, 83:1-11.
- [23] Camanho P P, Arteiro A. Analysis models for polymer

composites across different length scales [M]. Cham: Springer International Publishing, 2017.

- [24] Arteiro A, Catalanotti G, Reinoso J, et al. Simulation of the mechanical response of thin-ply composites: from computational micro-mechanics to structural analysis [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2018.
- [25] González C, Llorca J. Mechanical behavior of unidirectional fiber-reinforced polymers under transverse compression: Microscopic mechanisms and modeling [J]. Composites Science and Technology, 2007, 67:2795-2806.
- [26] Bai X, Bessa M A, Melro A R, et al. High-fidelity micro-scale modeling of the thermo-visco-plastic behavior of carbon fiber polymer matrix composites [J]. Composite Structures, 2015, 134:132-141.
- [27] Chevalier J, Camanho P P, Lani F, et al. Multi-scale characterization and modelling of the transverse compression response of unidirectional carbon fiber reinforced epoxy [J]. Composite Structures, 2019, 209:160-176.
- [28] Melro A R, Camanho P P, Andrade Pires F M, et al. Micromechanical analysis of polymer composites reinforced by unidirectional fibres: Part II: micromechanical analyses [J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50: 1906-1915.
- [29] Naya F, Pappas G, Botsis J. Micromechanical study on the origin of fiber bridging under interlaminar and intralaminar mode I failure [J]. Composite Structures, 2019, 210:877-891.
- [30] Totry E, González C, Llorca J. Failure locus of fiber-reinforced composites under transverse compression and out-of-plane shear [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68: 829-839.
- [31] Camanho P P, Arteiro A, Melro A R, et al. Three-dimensional invariant-based failure criteria for fibre-reinforced composites
 [J]. International Journal of Solids and Structures, 2015, 55: 92-107.
- [32] Herráez M, González C, Lopes C S, et al. Computational micromechanics evaluation of the effect of fibre shape on the transverse strength of unidirectional composites: An approach to virtual materials design [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 91:484-492.
- [33] Turon A, Camanho P P, Costa J, et al. A damage model for the

simulation of delamination in advanced composites under variable-mode loading [J]. Mechanics of Materials, 2006, 38: 1072-1089.

- [34] Maimí P, Camanho P P, Mayugo J A, et al. A continuum damage model for composite laminates: Part I: constitutive model [J]. Mechanics of Materials, 2007, 39:897-908.
- [35] Camanho P P, Bessa M A, Catalanotti G, et al. Modeling the inelastic deformation and fracture of polymer composites-Part II: Smeared crack model [J]. Mechanics of Materials, 2013,59: 36-49.
- [36] Tan W, Falzon B G. Modelling the crush behaviour of thermoplastic composites [J]. Composites Science and Technology, 2016, 134:57-71.
- [37] Mollenhauer D, Ward L, Iarve E, et al. Simulation of discrete damage in composite overheight compact tension specimens
 [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43:1667-1679.
- [38] Higuchi R, Okabe T, Nagashima T. Numerical simulation of progressive damage and failure in composite laminates using XFEM/CZM coupled approach [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 95:197-207.
- [39] Ostré B, Bouvet C, Minot C, et al. Edge impact modeling on stiffened composite structures [J]. Composite Structures, 2015, 126:314-328.
- [40] Rivallant S, Bouvet C, Hongkarnjanakul N. Failure analysis of CFRP laminates subjected to compression after impact: FE simulation using discrete interface elements [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 55:83-93.
- [41] Williams K V, Vaziri R, Poursartip A. A physically based continuum damage mechanics model for thin laminated composite structures[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003,40:2267-2300.
- [42] Bergan A, Davila C, Leone F, et al. An analysis methodology to predict damage propagation in notched composite fuselage structures [C]// Society for the Advancement of Material and Process Engineering Conference and Exhibition (SAMPE 2015),2015.
- [43] Zobeiry N, Forghani A, McGregor C, et al. Effective calibration and validation of a nonlocal continuum damage model for laminated composites [J]. Composite Structures,

2017,173:188-195.

- [44] Raghavan P, Li S, Ghosh S. Two scale response and damage modeling of composite materials [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2004,40:1619-1640.
- [45] Akterskaia M, Jansen E, Hallett S R, et al. Analysis of skinstringer debonding in composite panels through a two-way global-local method [J]. Composite Structures, 2018, 202: 1280-1294.
- [46] Šmilauer V, Hoover C G, Bažant Z P, et al. Multiscale simulation of fracture of braided composites via repetitive unit cells [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011,78:901-918.
- [47] Forghani A, Shahbazi M, Zobeiry N, et al. An overview of continuum damage models used to simulate intralaminar failure mechanisms in advanced composite materials [M]. Woodhead Publishing, 2015.
- [48] Yang Q D, Cox B N, Fang X J, et al. Virtual testing for advanced aerospace composites: advances and future needs [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2010, 133: 011002-011006.
- [49] Hahn H T, Tsai S W. Nonlinear elastic behavior of unidirectional composite laminae [J]. Journal of Composite Materials, 1973 (7):102-118.
- [50] Sun C T, Zhu C. The effect of deformation-induced change of fiber orientation on the non-linear behavior of polymeric composite laminates [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60:2337-2345.
- [51] Van Paepegem W, De Baere I, Degrieck J. Modelling the nonlinear shear stress, strain response of glass fibre-reinforced composites. Part II: model development and finite element simulations [J]. Composites Science and Technology, 2006,66: 1465-1478.
- [52] Vogler M, Rolfes R, Camanho P P. Modeling the inelastic deformation and fracture of polymer composites. Part I: plasticity model [J]. Mechanics of Materials, 2013, 59:50-64.
- [53] Koerber H, Kuhn P, Ploeckl M, et al. Experimental characterization and constitutive modeling of the non-linear stress, strain behavior of unidirectional carbon, epoxy under high strain rate loading [J]. Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, 2018(5):17.
- [54] Ramberg W, Osgood W R. Description of stress-strain curves

by three parameters [R]. NACA-TN-902. Hampton, 1943.

- [55] Tan W, Falzon B G. Modelling the nonlinear behaviour and fracture process of AS4/PEKK thermoplastic composite under shear loading [J]. Composites Science and Technology, 2016, 126:60-77.
- [56] Rybicki E F, Kanninen M F. A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral [Z]. Engineering Fracture Mechancis, 1977.
- [57] Hillerborg A, Modeer M, Petersson P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. Cement and Concrete Research, 1976(6):773-781.
- [58] Tvergaard V, Hutchinson J W. The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elasticplastic solids [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1992, 40:1377-1397.
- [59] Rice J R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks [J]. Journal of Applied Mechanics, 1968, 31:379-386.
- [60] Bažant Z P, Oh B H. Crack band theory for fracture of concrete[J]. Matériaux et Construction, 1983, 16:155-177.
- [61] Jiang W G, Hallett S R, Green B G, et al. A concise interface constitutive law for analysis of delamination and splitting in composite materials and its application to scaled notched tensile specimens [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 69:1982-1995.
- [62] Xie D, Waas A M. Discrete cohesive zone model for mixedmode fracture using finite element analysis [J]. Engineering Fracture Mechancis, 2006, 73:1783-1796.
- [63] 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 [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37:766-777.
- [64] Maimí P, Camanho P P, Mayugo J A, et al. A continuum damage model for composite laminates: Part II. Computational implementation and validation [J]. Mechanics of Materials, 2007, 39:909-919.
- [65] Lapczyk I, Hurtado J A. Progressive damage modeling in fiberreinforced materials [J]. Composites Part A: Applied Science

and Manufacturing. 2007, 38:2333-2341.

- [66] Bouvet C, Castanié B, Bizeul M, et al. Low velocity impact modelling in laminate composite panels with discrete interface elements [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009,46:2809-2821.
- [67] Chen B Y, Pinho S T, De Carvalho N V, et al. A floating node method for the modelling of discontinuities in composites [J]. Engineering Fracture Mechanics,2014,127:104-134.
- [68] Yang Q, Naderi M. A new augmented finite element method (A-FEM) for progressive failure analysis of advanced composite materials [M]. Woodhead Publishing, 2015.
- [69] Tsai S W, Wu E M. A general theory of strength for anisotropic materials [J]. Journal of Composite Materials, 1971(5):58-80.
- [70] Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980,47:329-334.
- [71] Puck A, Schürmann H. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models [J].
 Composites Science and Technology, 1998, 58:1045-1067.
- [72] Pinho S T, Vyas G M, Robinson P. Material and structural response of polymer-matrix fibre-reinforced composites: Part B [J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47:679-696.
- [73] Benzeggagh M L, Kenane M. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus [J]. Composites Science and Technology, 1996, 56:439-449.
- [74] Bergan A, Dávila C, Leone F, et al. A mode i cohesive law characterization procedure for through-the-thickness crack propagation in composite laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 94:338-349.
- [75] Ortega A, Maimí P, González E V, et al. Characterization of the translaminar fracture Cohesive Law [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 91:501-509.
- [76] Camanho P P, Dávila C G, Pinho S T, et al. Prediction of in situ strengths and matrix cracking in composites under transverse tension and in-plane shear [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37:165-176.
- [77] Makeev A, Seon G, Nikishkov Y, et al. Methods for assessment of interlaminar tensile strength of composite materials [J]. Journal of Composite Materials, 2014, 49:783-794.
- [78] Laffan M J, Pinho S T, Robinson P, et al. Translaminar fracture

toughness testing of composites: A review [J]. Polymer Testing, 2012, 31:481-489.

- [79] Czabaj M W, Ratcliffe J G. Comparison of intralaminar and interlaminar mode I fracture toughnesses of a unidirectional IM7/8552 carbon/epoxy composite [J]. Composites Science and Technology, 2013, 89:15-23.
- [80] Pinho S T, Robinson P, Iannucci L. Fracture toughness of the tensile and compressive fibre failure modes in laminated composites [J]. Composites Science and Technology, 2006, 66: 2069-2079.
- [81] Catalanotti G, Camanho P P, Xavier J, et al. Measurement of resistance curves in the longitudinal failure of composites using digital image correlation [J]. Composites Science and Technology, 2010, 70:1986-1993.
- [82] Catalanotti G, Arteiro A, Hayati M, et al. Determination of the mode I crack resistance curve of polymer composites using the size-effect law [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 118: 49-65.

- [83] Catalanotti G, Xavier J, Camanho P P. Measurement of the compressive crack resistance curve of composites using the size effect law [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 56:300-307.
- [84] Catalanotti G, Xavier J. Measurement of the mode II intralaminar fracture toughness and R-curve of polymer composites using a modified Iosipescu specimen and the size effect law [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015,138:202-214. (责任编辑 王为)

作者简介

庄福建(1991-)男,博士。主要研究方向:先进复合材料 与结构失效表征、分析与增强设计。 Tel:15251761283 E-mail:fjzhuang@nuaa.edu.cn 陈普会(1964-)男,博士,教授。主要研究方向:飞行器结 构综合设计技术以及先进复合材料结构设计技术。 Tel:13813988209 E-mail:phchen@nuaa.edu.cn

Virtual Testing of Fiber Reinforced Composite Laminated Structures

Zhuang Fujian^{1,2}, Chen Puhui^{1,*}

1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. Yangzhou CIRI, Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Yangzhou 225000, China

Abstract: This paper focuses on the virtual testing of continuous fiber reinforced laminated composite structures. Summary of the research progresses are presented from three aspects: failure mechanisms and mechanical characteristics, failure analysis models, and model verification and validation. Future development directions are also suggested. Particular attention is focused on failure mechanisms of typical structures on the coupon and element levels and the corresponding meso-scale failure models.

Key Words: composite; virtual testing; structural failure; finite element analysis; laminate

Received: 2019-07-02; Revised: 2019-07-15; Accepted: 2019-09-10

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11572152); China Scholarship (201706830020); The Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

*Corresponding author.Tel.: 13813988209 E-mail:phchen@nuaa.edu.cn