

# 拉伸载荷下正交三向机织复合材料接头失效多尺度渐进损伤分析

龙玲<sup>1</sup> 王晓芳<sup>2</sup> 张楠<sup>1</sup> 李超<sup>2</sup> 周光明<sup>1</sup>

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

(2 中材科技股份有限公司南京玻璃纤维研究设计院, 南京 210012)

**摘 要** 针对机械打孔三维机织复合材料耳片接头的单轴拉伸破坏性能,采用多尺度分析方法研究孔边纱线破坏过程。结果表明,正交三向(ORT)机织复合材料接头孔边的连续的经纱出现大量的纵向损伤;纬纱单元出现大量横向损伤,损伤沿着孔边45°方向逐渐扩展,纬纱发生剪切失效,最终接头的损伤形式为剪切破坏。数值模拟和试验结果的误差为1.14%,验证了多尺度有限元仿真方法的正确性。孔边细观区域的纱线损伤从孔边扩展到边接头边缘。孔边纱线的分布位置不同,纱线的破坏形式虽不一样,但是不影响破坏的扩展趋势。

**关键词** 三维机织复合材料,耳片接头,机械打孔,多尺度分析

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2023.03.005

## Multi-scale Progressive Damage Analysis of Orthogonal Three-way Woven Composite Joint Failure Under Tensile Load

LONG Ling<sup>1</sup> WANG Xiaofang<sup>2</sup> ZHANG Nan<sup>1</sup> LI Chao<sup>2</sup> ZHOU Guangming<sup>1</sup>

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

(2 Nanjing Fiberglass Research and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210012)

**Abstract** In order to examine the failure of uniaxial tension of mechanical perforated 3D woven composite lug joint, a multi-scale analysis way was used to investigate the pore edge yarn failure process. The results shows that there were a lot of longitudinal damage in the continuous warp yarn near the hole of orthogonal three-way (ORT) woven composite joint, a large number of transverse damage appeared in the weft element, and the damage gradually expanded along the 45° direction of the hole edge, there was shear damage in the weft yarn, finally, the joint failed shear failure. The error between the numerical simulation and experimental results is 1.14%, which verifies the correctness of the multi-scale finite element simulation method. The yarn damage in the meso-area of the hole edge extends from the hole edge to the edge of the side joint. The distribution position of hole edge yarns is different, and the destruction form of yarns is different, but it does not affect the expansion trend of destruction.

**Key words** 3D woven composites, Lug joint, Mechanical drilling, Multi-scale analysis

### 0 引言

在当今飞行器结构的设计研究过程中,连接结构元件、传递运动和传递集中载荷常采用耳片接头<sup>[1]</sup>。近年来,纤维增强复合材料接头成为研究热点,因为三维(3D)机织复合材料有优良的耐冲击和抗分层性能<sup>[2]</sup>,故在很多研究领域应用越来越广。然而,接头在打孔后会导致孔周边产生应力集中,孔边的应力位置分布和破坏过程非常复杂<sup>[3]</sup>。因此,在细观尺度下研究该区域内纱线的渐进损伤,对研究3D

机织复合材料接头的力学特性,在工程应用方面有很大意义<sup>[4]</sup>。准确研究3D机织复合材料接头孔边的局部细观纱线渐进损伤机理已成为相关科研人员面临的重要问题。

很多学者对先进复合材料接头的失效进行了深入研究。层合板接头的承载能力研究得很透彻,C. ATAS<sup>[5]</sup>从不同方面研究层合板接头不同的宽度与孔直径的比值( $W/D$ )、外边缘的距离与孔直径的比值( $E/D$ )对接头承载能力和破坏模式的影响。张琪

收稿日期:2022-10-08

第一作者简介:龙玲,1995年出生,硕士研究生,主要从事复合材料结构设计及强度分析与仿真研究工作。E-mail:LongLing@nuaa.edu.cn

等<sup>[6]</sup>对比分析两种L型接头的拉伸破坏形式,采用新型渐进损伤子程序预测L型接头的力学性能和损伤形式。上述研究重点主要侧重复合材料接头的宏观破坏形式和强度上,对孔边的纱线损伤演化过程并没有进行研究,因此,采取多尺度分析方法具有深远意义。王新峰<sup>[7]</sup>虽然概括分析了宏—细观两个尺度在施加荷载下损伤扩展过程,并建立了相应的渐进损伤分析方法,但是两个尺度都没有考虑纱线和基体之间界面产生的影响。邵兵<sup>[8]</sup>对开孔层压板孔边局部区域建立细观模型来研究开孔位置对孔边应力的影响以及影响孔边应力集中的因素,并未进一步探究孔边局部区域渐进损伤。陈占光<sup>[9]</sup>基于宏观和细观两个层面,提出了层级多尺度渐进损伤分析方法去预测开孔平纹机织复合材料强度和破坏模式,但是宏观均一化的分析方法不能很好地反映细观纱线的波动情况。

本文以机织形式为正交三向结构的3D机织复合材料接头<sup>[10]</sup>为研究对象,通过“Tie”接触将接头的宏—细观有限元模型绑定在一起,然后采用UMAT子程序完成接头破坏的多尺度模拟<sup>[3,11-12]</sup>,预测接头在单轴拉伸作用下的破坏载荷以及孔边细观区域纱线渐进损伤过程模拟。

## 1 ORT模型及计算方法

### 1.1 模型多尺度计算方法

本文通过将宏细观模型结合的多尺度分析方法对3D机织耳片接头进行失效模拟。鉴于计算复杂和计算时间长,选取模型的一半进行有限元渐进损伤分析。如图1所示,对宏观模型的左端施加XSYMM约束,在孔心建立参考点并沿经纱的伸长方向施加位移载荷,通过“Tie”接触把细观模型的外表面和宏观模型的内表面绑定在一起。

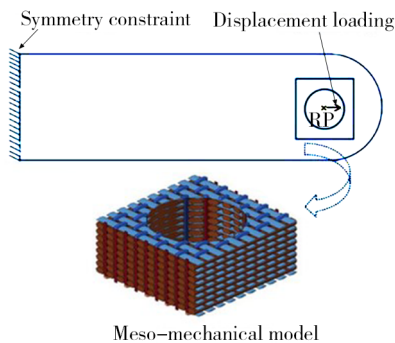


图1 有限元模型简化图

Fig. 1 Simplified graphic of finite element model

### 1.2 宏观模型

图2为本文研究的对象ORT宏观有限元模型。使用前处理软件Hypermesh对单元进行离散,设置单元类型为C3D8R。如表1所示为T300-12k碳纤维纱线和环氧树脂的工程弹性常数。定义纱线伸长方向为1方向,横向为2方向,厚度方向为3方向。

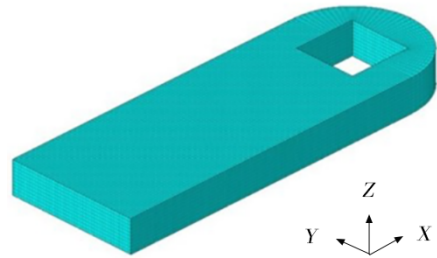


图2 ORT宏观有限元模型

Fig. 2 Macro finite element model with ORT

表1 碳纤维和环氧树脂基本弹性常数<sup>1)</sup>

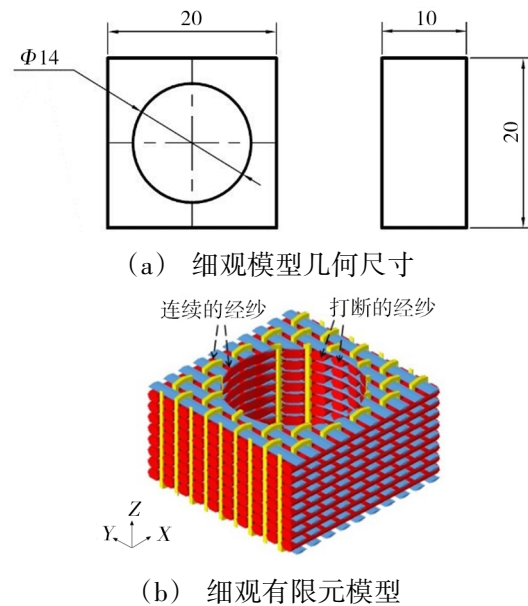
Tab. 1 Initial elastic constants of carbon fibers and epoxy

材料	弹性模量/GPa		剪切模量/GPa		泊松比		$E_m$ /GPa	$\mu_m$
	$E_{11f}$	$E_{22f}$	$G_{12f}$	$G_{23f}$	$\mu_{12f}$	$\mu_{23f}$		
碳纤维	230	13.8	13.8	4.8	0.2	0.25	-	-
环氧树脂	-	-	-	-	-	-	3.10	0.35

注:1)下角11、22为碳纤维1、2方向;下角12、23为碳纤维12、23面内方向。下角f、m分别代表碳纤维和环氧树脂。

### 1.3 细观结构建模

根据南京玻璃纤维研究设计院提供的正交三向预制件结构织造参数和纱线截面几何参数建立细观结构几何模型。依据孔边周围区域几何尺寸[图3(a)]在CATIA中建立预制件类型为正交三向结构的3D机织复合材料接头的细观实体模型,并在有限元前处理软件Hypermesh中进行单元离散[图3(b)]。



(a) 细观模型几何尺寸

(b) 细观有限元模型

图3 细观结构几何模型尺寸及示意图

Fig. 3 Meso-structure of geometrical model size and schematic diagram

正交三向3D机织复合材料接头的材料组分力学性能如表2所示。基体为各向同性,与基体固化后的纱线视作横观各向同性,结合A. B. MORAIS<sup>[13]</sup>、C. CHAMIS<sup>[14]</sup>以及NASA求纱线弹性的经验公式得到纱线不同方向的力学性能参数。

表2 正交三向结构碳纤维/环氧树脂机织复合材料接头力学参数

Tab. 2 Mechanical properties of the components of orthogonal tri-directional carbon fiber/epoxy braided composites joint

材料	弹性模量/GPa		剪切模量/GPa		泊松比		纤维1方向强度/MPa				环氧树脂强度/MPa		$S_m$ /MPa
	$E_{11}$	$E_{22}$	$G_{12}$	$G_{23}$	$\mu_{12}$	$\mu_{23}$	$X_{1t}$	$X_{1c}$	$E_m$ /GPa	$\mu_m$	$X_{mt}$	$X_{mc}$	
碳纤维	180.08	9.92	5.00	3.50	0.23	0.42	3530	2286	-	-	-	-	
环氧树脂	-	-	-	-	-	-			3.10	0.35	60	241	60

纱线的强度值<sup>[15]</sup>计算如下式:

$$\begin{cases} F_{1t} = \alpha_t X_{1t} V_f \\ F_{1c} = \alpha_c X_{1c} V_f \\ F_{2t} = \frac{1 + V_f \left( \frac{1}{\eta_t} - 1 \right)}{K_{mt}} X_{mt} \\ F_{2c} = 4F_{2t} \\ S_{12} = \frac{1 + V_f \left( \frac{1}{\eta_s} - 1 \right)}{K_{ms}} S_m \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $F_{1t}$  为纱线纵向拉伸强度;  $F_{1c}$  为纱线纵向压缩强度;  $F_{2t}$  为纱线横向拉伸强度;  $F_{2c}$  为纱线横向压缩强度;  $S_{12}$  为纱线纵向剪切强度;  $\alpha_t$  为纱线纵向拉伸强度修正系数;  $\alpha_c$  为纱线纵向压缩强度修正系数, 取值为 0.8;  $K_{mt}$  为基体拉伸应力集中系数, 取值 2.0;  $K_{ms}$  为基体剪切应力集中系数, 取值为 1.0;  $\eta_t$  为经验系数,  $\eta_s$  为经验系数, 取值均 0.5。

#### 1.4 渐进损伤分析

3D 机织复合材料的失效种类包括纱线断裂、基体开裂、纱线与基体界面脱粘等<sup>[13]</sup>。本文使用如下 3D Hashion 准则<sup>[10,16]</sup>作为材料失效的判据, 采用渐进损伤的分析方法对宏细观模型进行计算<sup>[3]</sup>。纱线拉伸失效 ( $FDV_1 = 1$ ),  $\sigma_{11} \geq 0$ ,

$$\left( \frac{\sigma_{11}}{X_T} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{13}}{S_{13}} \right)^2 = 1 \quad (2)$$

纱线压缩失效 ( $FDV_2 = 1$ ),  $\sigma_{11} < 0$ ,

$$\left( \frac{\sigma_{11}}{X_C} \right)^2 = 1 \quad (3)$$

纱线基体拉伸失效 ( $FDV_3 = 1$ ),  $\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0$ ,

$$\left( \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_T} \right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left( \frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{13}}{S_{13}} \right)^2 = 1 \quad (4)$$

纱线基体压缩失效 ( $FDV_4 = 1$ ),  $\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$ ,

$$\frac{1}{Y_C} \left[ \left( \frac{Y_C}{2S_{12}} \right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \left( \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{12}} \right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left( \frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{13}}{S_{13}} \right)^2 = 1 \quad (5)$$

式中,  $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$  表示材料主方向上的应力分量<sup>[16]</sup>;  $X_T, X_C$  分别是纵向拉伸强度和纵向压缩强

度;  $Y_T, Y_C$  分别是横向拉伸强度和横向压缩强度;  $S_{12}, S_{13}, S_{23}$  分别是 1-2 面、1-3 面、2-3 面的剪切强度;  $FDV_1, FDV_2$  分别表示纱线在拉伸、压缩状态下的损伤状态变量,  $FDV_3, FDV_4$  分别表示纱线和基体在拉伸、压缩状态下的损伤状态变量, 当损伤状态变量等于 1 时, 表示单元出现损伤。

当单元发生损伤时, 材料性能发生折减, 表 3 列为材料在不同破坏形式下的刚度折减准则。

表3 材料刚度性能折减准则<sup>[10]</sup>

Tab. 3 Standard for reduction of stiffness properties of materials

失效模式	刚度折减准则
纱线拉伸失效 ( $FDV_1 = 1$ )	$Q_d = 0.07Q (Q = E_{11}, G_{12}, G_{13})$
纱线压缩失效 ( $FDV_2 = 1$ )	$Q_d = 0.14Q (Q = E_{11}, G_{12}, G_{13})$
纱线基体拉伸失效 ( $FDV_3 = 1$ )	$Q_d = 0.2Q (Q = E_{22}, G_{12}, G_{23})$
纱线基体压缩失效 ( $FDV_4 = 1$ )	$Q_d = 0.4Q (Q = E_{22}, G_{12}, G_{23})$

## 2 结果及分析

### 2.1 试验结果

试验过程具体内容见文献[10], 正交三向 3D 机织复合材料接头的轴向拉伸试验的夹具见图 4, 夹具的两端分别夹持在 MTS370. 25 疲劳试验机的两端。

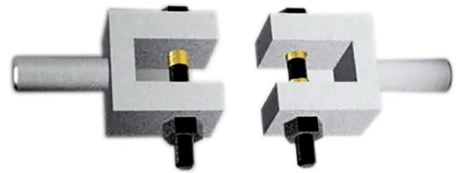


图4 ORT 轴向拉伸夹具示意图

Fig. 4 Schematic diagram of axial tension fixture of ORT

对加载破坏后的接头用高分辨率全能型纳米焦点 CT 检测系统进行表面以及内部结构检测, 结果 CT 如图 5 所示<sup>[10]</sup>。

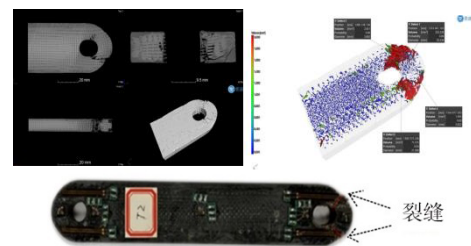


图5 ORT 试验件 CT 扫描图和破坏图

Fig. 5 ORT test part CT scan and damage diagram



## 2.2 有限元结果分析 CT扫描剖面图

本文定义的纱线的材料方向如下:定义经纱的局部坐标系1方向和接头加载方向一致;纬纱的局部坐标系2方向和接头加载方向一致;Z向纱的局部坐标系比较复杂,沿着纱线的长度方向为1方向。

如图6所示为经纱、纬纱和Z向纱损伤云图随载荷增加的变化,其中红色区域表示单元失效。

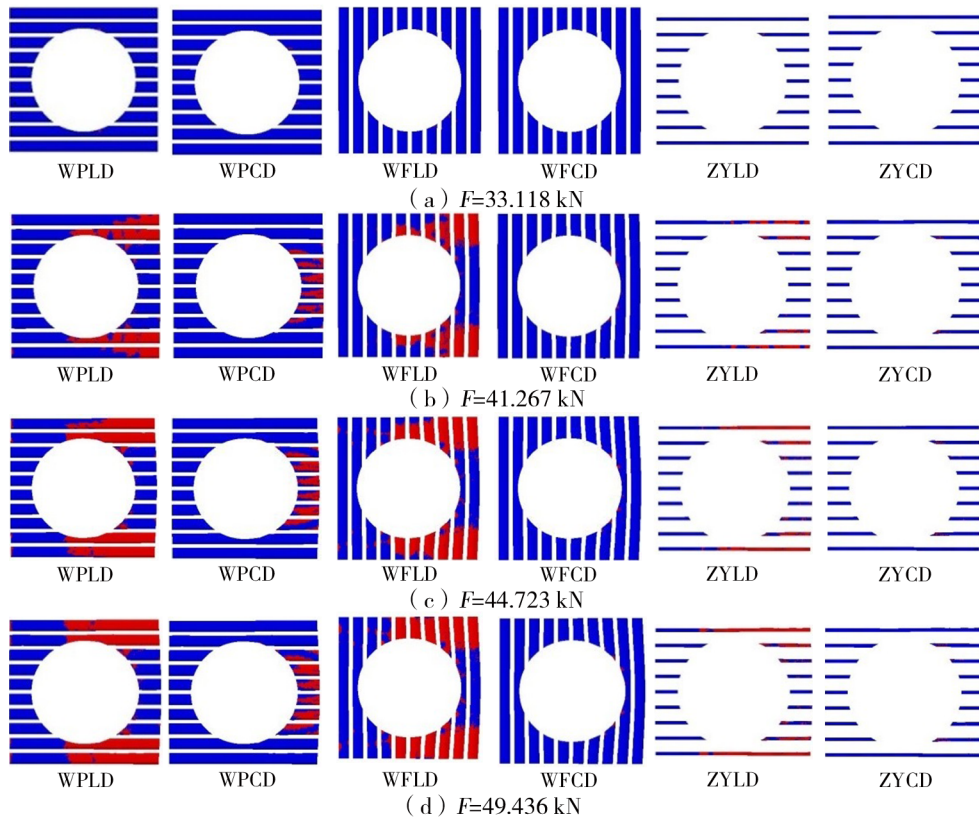


图6 正交三向接头纱线损伤扩展过程

Fig. 6 Damage propagation process of orthogonal triaxial joint fiber bundles  
WPLD-经纱纵向拉伸损伤;WPCD-经纱纵向压缩损伤;WFLD-纬纱横向拉伸损伤;  
WFCD-纬纱横向压缩损伤;ZYLD-Z向纱纵向拉伸损伤;ZYCD-Z向纱纵向压缩损伤。

当载荷达到33.118 kN时,孔边纱线开始出现损伤。由于纱线的材料及几何属性不同,其损伤程度也不相同。当载荷达到41.267 kN时,经纱开始出现纵向损伤,连续的经纱出现经纱纵向拉伸损伤(WPLD)并沿连续的经线方向继续扩展。由于孔边受销钉不断挤压,所以,打断的经纱出现经纱纵向压缩损伤(WPCD)。随着挤压程度不断加深,该区域的压缩损伤区域不断扩展。纬纱的横向损伤沿着纱线继续扩展。当载荷增加到44.723 kN时,纬纱横向损伤继续扩展,损伤扩展到连续的经纱和纬纱的交界处时,纱线出现界面分层。纬纱横向拉伸损伤(WFLD)沿着45°方向不断扩展,Z向纱和纬纱的纱线界面也出现脱粘,Z向纱的损伤也不断加深。由于孔边经纱被打断,承载能力明显下降,在加载过程中,孔边纬纱相应承受更多载荷。当载荷到达

49.436 kN的时候,纬纱和经纱分别发生不同程度的断裂,连续的经纱出现纵向破坏,接头主要损伤模式为纬纱横向剪切破坏。接头损伤模式与试验结果以及CT扫描结果一致,试件上下表面断口与经纱方向大致呈45°,沿经纱方向孔边CT扫描截面视图,可以直观看到纬纱断裂的现象,经纱也出现开裂。

如图7所示为宏观模型和纱线的损伤云图随载

荷增加的变化,红色区域表示单元失效。初始损伤在孔边产生,损伤沿着与经纱大致呈45°方向扩展到接头端部,最终接头发生剪切破坏。裂纹扩展趋势与试验件发生破坏的形式一致。

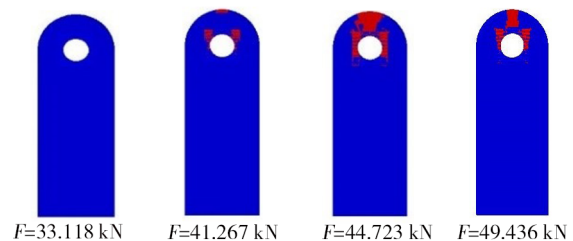


图7 ORT损伤扩展云图

Fig. 7 Damage extended cloud map of ORT

## 3 结论

本文开展了机织形式为正交三向3D机织复合材料接头轴向拉伸破坏的多尺度分析,分析了孔边

纱线的损伤扩展过程,得出以下结论。

(1)计算正交三向接头宏-细观有限元模型的破坏载荷。在轴向拉伸过程中,损伤从孔边沿着 $45^\circ$ 方向扩展至接头的两端,最终拉伸破坏载荷为49.436 kN,数值模拟和试验数据误差为1.14%。

(2)对孔边细观区域纱线拉伸破坏过程进行模拟。结果表明,随着载荷的增大,连续的经纱的损伤沿着孔边向周边延伸,纱线界面逐渐分层,纬纱的损伤沿着 $45^\circ$ 方向扩展,最终发生横向断裂的是纬纱,连续的经纱发生纵向断裂,损伤从细观模型孔边延伸至宏观模型的边缘。

(3)孔边纱线的位置不同,虽然对纱线的失效形式产生影响,但是不影响裂纹扩展的大致走向。孔边连续的经纱在加载过程中承受纵向载荷,孔边右侧的打断的经纱在轴向加载的过程中承受压缩载荷,纬纱在孔边的位置与加载方向垂直,使得纬纱发生横向破坏,最终纬纱发生剪切破坏。

本文提出对接头进行宏-细观多尺度分析,在计算正交三向3D机织复合材料接头破坏载荷的同时模拟孔边纱线的损伤演化过程,从而更加全面地分析机械打孔的3D机织复合材料接头的破坏过程,也为以后设计特殊结构的3D机织复合材料接头提供参考。

#### 参考文献

[1] 王琪. 耳片接头结构的拓扑优化与参数化设计研究[D]. 南京航空航天大学,2016.

WANG Q. Research on topology optimization and parametric design of lug connectors [D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[2] 陈伟,张楠,李超,等. G/C纬向混杂浅交弯联三维机织复合材料的低速冲击性能[J]. 宇航材料工艺,2020,50(02):52-56.

CHEN W, ZHANG N, LI C, et al. Low velocity impact properties of G/C hybrid interlock 3D woven composites [J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(02): 52-56.

[3] 杜翔宇,高希光,宋迎东. 2.5D C/SiC复合材料带孔板拉伸破坏的多尺度模拟[J]. 推进技术,2020,41(02):439-446.

DU X Y, GAO X G, SONG Y D. Multiscale simulation on tensile failure analysis of 2.5D C/SiC composite orifice plate [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(02): 439-446.

[4] 罗嘉. 基于宏-细观多尺度建模的机织复合材料渐进损伤和失效分析[D]. 哈尔滨工业大学,2017.

LUO J. Progressive damage and failure analysis of woven composites based on macro-meso-multi-scale modeling [D]. Harbin Institute of Technology, 2017.

[5] ATAS C. Bearing strength of pinned joints in woven fabric composites with small weaving angles [J]. Composite Structures, 2009, 88(1):40-45.

[6] 张琪,蔡登安,余章杰,等. 碳纤维/环氧树脂复合材料L型接头拉伸失效机制[J]. 复合材料学报,1-12[2022-09-02].

ZHANG Q, CAI D A, YU Z J, et al. Tensile failure mechanism of carbon fiber/epoxy composite L-joints [J]. Acta Materiae Compositae Sinica; 1-12[2022-09-02].

[7] 王新峰. 机织复合材料多尺度渐进损伤研究[D]. 南京航空航天大学,2007.

WANG X F. Multi-scale analyses of damage evolution in woven composite materials [D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.

[8] 邵兵. 大丝束碳纤维平纹编织复合材料孔边应力细观分析 [D]. 南昌大学,2018.

SHAO B. The mesomechanical analysis of stresses near central hole in big carbon tow plain-woven composite [D]. Nanchang University, 2018.

[9] 陈占光. 基于多尺度方法的含孔机织复合材料强度分析研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.

CHEN Z G. Strength analysis of woven composites with holes based on multi-scale method [D]. Harbin Institute of Technology, 2021.

[10] 王晓芳. 三维机织复合材料接头力学性能研究 [D]. 南京航空航天大学, 2021.

WANG X F. Mechanical properties of three-dimensional woven composite Joint [D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.

[11] GUO J H, WEN W D, ZHANG H J, et al. Warp-loaded mechanical performance of 3D orthogonal layer-to-layer woven composite perforated structures with different apertures [J]. Composite Structures, 2021, 278: 114720.

[12] WARREN K C, LOPEZ-ANIDO R A, VEL S S, et al. Progressive failure analysis of three-dimensional woven carbon composites in single-bolt, double-shear bearing [J]. Composites Part B: Engineering, 2016. 84: 266-276.

[13] MORAIS A B. Transverse moduli of continuous-fibre-reinforced polymers [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(7): 997-1002.

[14] CHAMIS C. Mechanics of composite materials: past, present and future [J]. Journal of Composites Technology and Research, 1989, 11: 3-14.

[15] 彭秀钟, 范进. 基于面-内胞模型的三维四向编织复合材料渐进损伤数值模拟 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(02): 545-556.

PENG X Z, FAN J. Progressive damage simulation of 3D four-directional braided composites based on surface-interior unit-cells models [J]. Journal of Composite Materials, 2021, 38(02): 545-556.

[16] 潘如琴. 三维机织复合材料加筋板压缩性能研究 [D]. 南京航空航天大学, 2017.

PAN R Q. Research on compression performance of 3D woven composite stiffened plate [D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.