

熔丝制造 3D 打印 CFRP 层内损伤破坏机理与模型研究

刘 继¹, 李 珍², 药天运³

(1. 陕西铁路工程职业技术学院 道桥与建筑学院, 陕西 渭南 714099; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710061;
3. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 为将 3D 打印技术应用到桥梁工程中, 以熔丝制造 3D 打印碳纤维复合材料锚环为研究对象, 开展了材料层内损伤失效机理的基础性研究工作。首先, 对锚环进行了张拉锚固破坏试验, 明晰材料的损伤失效模式。其次, 测试分析了材料的弹性参数及强度参数值, 供后续仿真分析使用。最后, 通过 VUMAT 子程序构建了材料的损伤失效本构关系, 利用 ABAQUS 仿真分析软件模拟熔丝制造 3D 打印碳纤维复合材料锚环的渐进损伤失效全过程, 分析其层内损伤失效机理。结果表明: 熔丝制造 3D 打印碳纤维复合材料具有显著的层内损伤现象; 选用 Hashin 损伤起始判据与刚度瞬间退化模型作为熔丝制造 3D 打印碳纤维复合材料损伤力学模型偏于安全, 具有一定的可行性; 锚环在高度方向产生纵向裂纹是由纤维拉伸失效导致的。

关键词: 桥梁工程; 熔丝制造技术; 碳纤维复合材料; 损伤失效机理; 夹片式锚具

中图分类号: TU599; U444

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)01-0074-08

Research on damage and failure mechanism and model of 3D printed cfrp layer by fused filament fabrication

LIU Ji¹, LI Zhen², YAO Tianyun³

(1. School of Bridge and Building, Shaanxi Railway Institute, Shaanxi Weinan 714099, China;
2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710061, China;
3. College of Civil Engineering and Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to apply 3D printing technology to bridge engineering, the basic research work on the mechanism of damage and failure within the material layer was carried out, with the manufacturing of 3D printed carbon fiber composite anchor rings using fuse as the research object. Firstly, tensile anchorage failure test was carried out to clarify the damage failure mode of the anchor ring. Secondly, the elastic parameters and strength parameters of the material are tested and used for subsequent simulation analysis. Finally, the damage failure constitutive relationship of the material was constructed by VUMAT subroutine, and the whole process of progressive damage failure of the 3D-printed carbon fiber reinforced plastic anchor ring was simulated by ABAQUS simulation analysis software, and the damage failure mechanism in the layer was analyzed. The results show that the intra damage of 3D printed carbon fiber reinforced plastic manufactured by fuse is significant. The use of Hashin damage initiation criterion and stiffness instantaneous degradation model as the damage mechanical model of 3D printing carbon fiber reinforced plastic is safe and feasible. The longitudinal cracks in the height direction of the anchor ring are caused by fiber tensile failure.

Key words: bridge engineering; fused filament fabrication; carbon fiber reinforced plastics; damage failure mechanism; clip anchor

近些年来, 我国从桥梁建设大国向桥梁建设强国不断迈进, 桥梁建造技术日新月异, 推动新技术与桥梁制造融合发展是提升桥梁制造水平的重要举措。3D 打印是制造业中一项新兴的产业技

术, 与传统的“去除型”方式相比, 3D 打印不需要制作模板与原胚, 直接按照计算机模型, 通过增加材料的技术制作成任何复杂形状的物体, 该项技术可简化产品制造工序、缩短产品加工周期、

收稿日期: 2022-09-16

修回日期: 2023-01-01

基金项目: 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102282108); 陕西铁路工程职业技术学院科研基金项目(KY2019-50)

第一作者: 刘 继(1989—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事大跨桥梁施工、桥梁工程智能制造研究。E-mail: lj_hpu@163.com

提高产品生产效率并降低研制成本, 促进桥梁精密零部件的快速化、规模化、专业化制造。

碳纤维复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastic, 简称 CFRP) 具有比强度大、比模量高、耐久性好等优势, 已被应用于拉索体系、桥梁加固中^[1-2], 但存在模具昂贵、制备工艺复杂、设计制造灵活性差等问题, 严重限制了 CFRP 在高端设备制造中的应用。而借助熔丝制造 3D 打印技术 (Fused Filament Fabrication, 简称 FFF) 生产 CFRP 则能够较好地解决上述问题。

FFF 成型过程分为进料、挤出、沉积三个阶段, 其成型原理是: 预先建立好三维实体模型, 利用指定切片软件将模型进行堆叠方向的切分, 同时设置打印参数控制打印机工作。FFF 3D 打印机首先将丝状的热熔性原材料送入喷嘴中, 待喷嘴温度达到材料熔融温度后, 沿着预设填充路径运动并挤出热熔材料, 材料在指定位置熔融沉积并冷却固化, 与前一层已经成型材料粘结, 层层堆积, 最终形成三维实体模型^[3], 成型过程如图 1 所示。

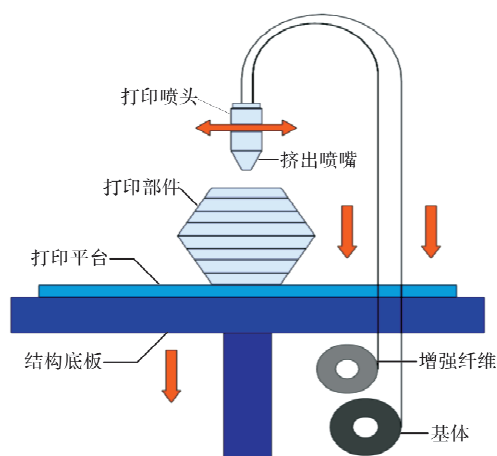


图 1 熔丝制造成型过程示意图

Fig. 1 Process schematic diagram of fused filament fabrication

FFF 复合材料由纤维和基体组成, 其中, 纤维为承担荷载的主体, 基体起保护、固定纤维的作用。FFF 复合材料的力学性能受原材料、几何参数及打印参数等影响, 具有较强的变异性, 在荷载作用下可能出现不同的损伤失效模式, 包括纤维拉伸失效、纤维压缩失效、基体拉伸失效、基体压缩失效、纤维-基体剪切失效、层间拉伸失效、层间剪切失效 7 种类型^[4]。其中, 前 5 种破坏类型发生在材料纤维布置平层内, 称为层内损伤; 后 2 种破坏类型发生在垂直纤维布置平面方向, 称为层间损伤。

目前, 国内外学者大多通过试验研究的方法

获得 FFF 复合材料的力学性能及损伤失效模式。文献[5-10]研究结果表明, FFF 复合材料的拉伸及弯曲性能随纤维体积分量的增加呈上升趋势, 在相同的纤维体积分量下, 碳纤维增强复合材料通常表现出的力学性能最佳, 可达到金属材料力学性能量级, 而玻璃纤维与芳纶纤维增强复合材料较差。文献[11-12]的研究结果显示, 增加纤维长度及连续性可以提高材料的抗拉性能。除原材料参数外, 打印温度、打印层厚、打印线宽、打印速度、材料填充方式等打印参数通过控制材料的孔隙率、成型丝材之间的界面粘结而间接影响 FFF 复合材料宏观力学性能^[13]。文献[14-15]通过试验发现, FFF 复合材料孔隙率远大于传统工艺成型复合材料, 较大的孔隙率会降低材料的力学性能。在拉伸、弯曲荷载作用下, FFF 复合材料呈现出脆性破坏特征, 出现了受拉纤维断裂、受压纤维屈曲、基体开裂、纤维拔出、分层扩展破坏现象^[6-7]。

有限元分析是预测 FFF 复合材料力学性能及损伤破坏特征的重要手段^[16]。Al-Abadi 等^[17]利用数值模拟方法明晰了层合板的损伤失效机理。Swolfs 等^[18]通过有限元分析方法, 研究了复合材料层合板裂纹扩展与层间断裂韧性的关系。Zhang 等^[19]考虑了 FFF 打印过程中的温度场及熔融流场, 优化了打印过程, 避免打印过程中的断丝、松弛等现象出现。

现阶段关于 FFF 复合材料损伤失效的研究, 还停留在通过试验对材料的力学性能和损伤机理进行定性分析, 尤其是在 FFF 复合材料层内损伤失效模型和本构关系方面仍十分欠缺。为研究熔丝制造碳纤维复合材料 (FFF-CFRP) 的层内损伤机理, 本文设计制作了 FFF-CFRP 预应力锚环, 对其进行张拉锚固破坏试验, 明确其损伤失效模式, 随后测试了 FFF-CFRP 材料的力学性能参数, 然后建立了 FFF-CFRP 材料的损伤失效模型与本构模型, 利用 ABAQUS 有限元软件模拟 FFF-CFRP 锚环的损伤失效全过程, 研究结果为 FFF-CFRP 材料力学性能改善及应用奠定基础。

1 FFF-CFRP 锚环张拉锚固破坏试验

1.1 试件制备与加载

本次试验原材料采用短碳纤维增强尼龙 PA6-CF, 其中基体尼龙为热塑性材料, 短碳纤维为复合材料增强体。FFF 3D 打印机选用 Pro2 plus 3D, 其配套切片软件为 ideaMaker, 采用切片软件对打

印试件进行丝材布置和打印参数设置. 本文选取 FFF-CFRP 锚环的打印参数如表 1 所示.

表 1 FFF-CFRP 锚环试件打印参数
Tab. 1 Print parameters of specimen

层厚	线宽	填充率	填充重叠率	温度	速度
0.2 mm	0.4 mm	99%	5%	265 ℃	40 mm/s

参照传统单孔夹片式锚具尺寸, 对 FFF-CFRP 锚环尺寸进行设计, 详细尺寸见图 2, 共 5 个试件. 考虑到夹片式锚具锚环结构受力形式及 FFF-CFRP 材料力学性能特点, 将 FFF-CFRP 锚环丝材沿环向进行布置. FFF-CFRP 锚环张拉锚固破坏试验仪器采用预应力张拉反力架, 钢绞线锚固端采用 FFF-CFRP 锚环与金属夹片, 张拉端采用传统金属夹片式锚具. 试验通过手压油泵对千斤顶进行加载, 同时, 利用压力传感器读取加载力值. 图 3 为 FFF-CFRP 锚环张拉锚固破坏试验装置.

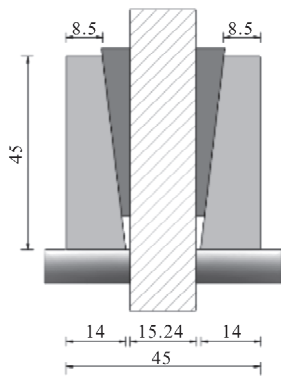


图 2 单孔夹片式锚具尺寸(单位: mm)
Fig. 2 Single hole clamp anchor size (Unit: mm)



图 3 FFF-CFRP 锚环张拉锚固破坏试验装置
Fig. 3 FFF-CFRP anchor ring tension anchoring failure test instrument

1.2 试验结果

图 4 为 FFF-CFRP 锚环破坏形态, 锚环承载力及损伤失效模式见表 2. 可以看出, FFF-CFRP 锚环承载能力离散程度较大, 这主要是因

为打印机的制作偏差(包括打印喷头的劣化, 打印底板的平整度)以及保存过程中环境温湿度差异导致试件成型质量不均匀^[20]. 由损伤失效模式可知, FFF-CFRP 材料层内与层间损伤现象均十分显著.



图 4 FFF-CFRP 锚环破坏形态
Fig. 4 FFF-CFRP anchor ring damage pattern

表 2 FFF-CFRP 锚环承载力及损伤失效模式

Tab. 2 FFF-CFRP anchor ring bearing capacity and damage failure mode				
编号	承载力 /kN	平均值 /kN	标准差	损伤失效模式
1 #	19.5	31.3	8.2	在高度方向纵向开裂、靠近孔侧分层失效
2 #	39.7			
3 #	28.3			
4 #	38.4			
5 #	30.6			

2 FFF-CFRP 材料力学性能参数测定

结合 FFF 成型工艺特点可知, FFF-CFRP 为正交各向异性材料, 定义 FFF-CFRP 材料的坐标系如图 5 所示, 其中 1 方向为纤维布置方向, 受力主体为短碳纤维; 2、3 方向分别为层内垂直纤维方向、打印层堆叠方向, 二者的宏观力学性能主要取决于丝材间的界面粘结.

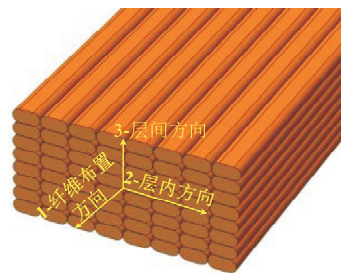


图 5 FFF-CFRP 材料坐标系
Fig. 5 Coordinate system of FFF-CFRP material

本文测试了表 3、表 4 所列 FFF-CFRP 材料弹性常数及强度参数值, 分别用于构建正交各向异性材料刚度矩阵及材料损伤起始判据. 其中, 弹性模量、拉伸强度、泊松比通过标准拉伸试验测试, 剪切模量、剪切强度通过 45°单向铺设偏轴拉伸试验测试, 压缩强度通过压缩试验测得.

表 3 FFF-CFRP 材料弹性常数

Tab. 3 Elastic constants of FFF-CFRP materials

弹性模量			泊松比			剪切模量		
E_1	E_2	E_3	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}

表 4 FFF-CFRP 材料强度参数

Tab. 4 Strength constant of FFF-CFRP materials

拉伸强度			压缩强度			剪切强度		
T_1	T_2	T_3	C_1	C_2	C_3	S_{12}	S_{13}	S_{23}

参考国际标准 ASTM-3039^[21], 标准拉伸试验及 45°单向铺设偏轴拉伸试验的测试试件采用 II 型矩形试样, 由于打印试件的成型质量受试件尺寸的影响, 因此对标准试件进行了尺寸优化, 本文共设计 3 种拉伸试验测试试件尺寸, 试件几何特征见图 6。

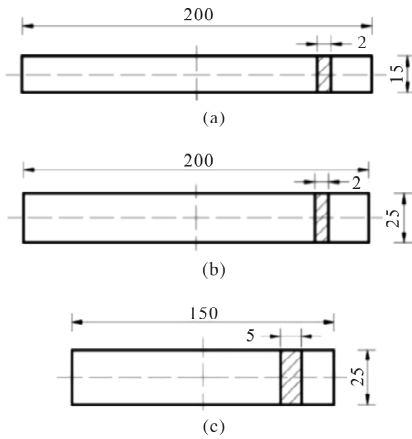


图 6 拉伸试验试件几何特征(单位: mm)

Fig. 6 Geometric dimensions of tensile test specimen (Unit: mm)

2.1 拉伸试验

为测试 FFF-CFRP 材料 3 个方向的弹性模量及拉伸强度, 采用 3 种试件切片形式. 其中, 方向 1 试件尺寸同图 6(a), 方向 2 试件尺寸同图 6(b), 方向 3 试件尺寸同图 6(c). 每个试验组共 5 个试件, 打印参数同表 1 所示. 试件力学性能测试采用三思纵横万能电子试验机, 并配备标距为 50 mm 的引伸计. 本次试验的加载速率设置为 3 mm/min, 通过位移控制试件加载全过程, 直至试件完全被拉断, 图 7 为试件拉伸过程。

通过试验加载获得三组试件拉伸应力应变曲线, 基于 FFF-CFRP 材料拉伸强度计算式与弹性模量计算式^[20], 在表 1 打印参数下, 材料拉伸强度与拉伸弹性模量测试结果如表 5 所示。

表 5 FFF-CFRP 材料拉伸性能

Tab. 5 Tensile test results of FFF-CFRP materials

E_1 /MPa	E_2 /MPa	E_3 /MPa	T_1 /MPa	T_2 /MPa	T_3 /MPa
12 920.9	2 460.6	2 382.5	125.4	32.7	20.6



图 7 拉伸试验过程

Fig. 7 Tensile test process

拉伸过程中通过应变采集仪读取试件纵横向应变, FFF-CFRP 材料的泊松比计算公式为

$$\nu_{ij} = -\frac{\Delta\epsilon_j}{\Delta\epsilon_i} \quad (1)$$

式中: ν_{ij} 为单轴应力 σ_i 作用在 i 方向时, 在 j 方向引起横向应变的泊松比; $\Delta\epsilon_j$ 为 j 方向的应变; $\Delta\epsilon_i$ 为 i 方向的应变. 通过上式得到 ν_{12} 、 ν_{13} 、 ν_{32} 值, 由 Maxwell-Betti 交互定理可知 ν_{21} 、 ν_{31} 、 ν_{23} 的值, 结果见表 6 所示。

表 6 FFF-CFRP 材料泊松比

Tab. 6 Poisson's ratio test results of FFF-CFRP materials

ν_{12}	ν_{21}	ν_{13}	ν_{31}	ν_{32}	ν_{23}
0.343	0.065	0.347	0.043	0.307	0.297

2.2 剪切试验

本文基于美国规范 ASTM D 3518^[22] 试验方法, 根据二向应力作用下的莫尔强度准则将测试方法进行改进, 设计打印角度为 45°的试件, 1/2 方向测试试件尺寸同图 6(b), 2/3 平面、1/3 平面测试试件尺寸同图 6(c), 每组共 5 个试件. 通过 45°偏轴拉伸试验测试材料剪切性能. 根据莫尔强度准则可知, 45°拉伸试件的剪切强度计算式为

$$\tau_m = \frac{F_m}{2A_0} = \frac{F_m}{2ab} \quad (2)$$

式中: τ_m 为剪切强度, MPa; F_m 为试件最大拉伸荷载, N; $A_0 = ab$ 为试件原始横截面面积, mm².

剪切模量表达式为

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{4}{E_{45^\circ}} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{21}}{E_1}} \quad (3)$$

$$G_{13} = \frac{1}{\frac{4}{E_{45^\circ}} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_3} + \frac{2\nu_{31}}{E_1}} \quad (4)$$

$$G_{23} = \frac{1}{\frac{4}{E_{45^\circ}} - \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_3} + \frac{2\nu_{32}}{E_2}} \quad (5)$$

式中: E_{45° 为 45° 拉伸试件的弹性模量, MPa, 其余参数同前所述。

根据 45° 拉伸试件的应力应变曲线可得其拉伸强度及弹性模量, 根据式(2)~式(5)计算材料剪切强度与剪切模量, 计算结果如表7所示。

表7 FFF-CFRP 材料剪切性能

Tab.7 Shear performance test results of FFF-CFRP materials

G_{12} /MPa	G_{13} /MPa	G_{23} /MPa	S_{12} /MPa	S_{13} /MPa	S_{23} /MPa
619.8	1347.3	952.6	10.4	11.3	8.3

2.3 压缩试验

参照美国标准 ASTM D3410^[23], 压缩强度测试试件尺寸拟定为两种, 如图8所示。图9展示了压缩试验过程, 在表1打印参数下, FFF-CFRP 材料压缩强度测试结果见表8。

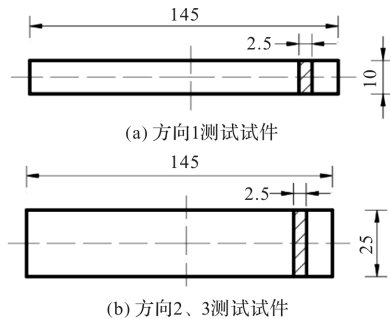


图8 压缩强度测试试件几何特征(单位: mm)

Fig.8 Geometric dimensions of compression strength test specimen (Unit: mm)

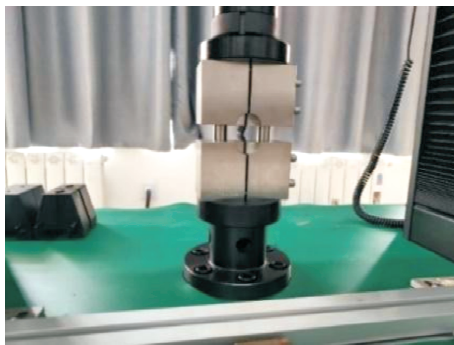


图9 压缩试验过程

Fig.9 Compression test process

表8 FFF-CFRP 材料压缩强度测试结果

Tab.8 Compression strength test results of FFF-CFRP materials

C_1 /MPa	C_2 /MPa	C_3 /MPa
93.5	33.4	23.3

3 FFF-CFRP 锚环层内损伤失效模型及数值模拟

3.1 FFF-CFRP 材料损伤失效模型

由于 FFF-CFRP 材料具有各向异性的特点, 在损伤失效过程中, 纤维、基体的拉压应力、剪

切应力具有交互作用, 损伤起始需要通过复合应力进行表征。同时, 为区分不同类型的损伤失效模式, 需要单独构建材料损伤失效准则, 并采用材料性能退化模型对材料的刚度系数进行折减, 来模拟材料损伤演化过程。

三维 Hashin 损伤失效判定准则被广泛应用于复合材料渐进损伤分析模型中, 该准则适用于各种荷载形式, 可有效判断、区分并描述材料损伤模式, 并且与试验结果有较好的一致性, 其表达式中参数较少, 易于测得。本文基于三维 Hashin 损伤失效准则, 建立适用于 FFF-CFRP 的损伤失效模型。三维 Hashin 损伤失效准则判断复合材料层内损伤破坏的表达式如下^[24]。

纤维拉伸破坏($\sigma_{11} \geq 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{T_1}\right)^2 + \frac{1}{S_{12}^2}(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2) \geq 1 \quad (6)$$

纤维压缩破坏($\sigma_{11} < 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{C_1}\right)^2 \geq 1 \quad (7)$$

基体拉伸破坏($\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0$):

$$\frac{1}{T_2^2}(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \frac{1}{S_{23}^2}(\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33})^2 + \frac{1}{S_{12}^2}(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2) \geq 1 \quad (8)$$

基体压缩破坏($\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$):

$$\frac{1}{C_2^2} \left[\left(\frac{C_2}{2S_{23}} \right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1}{4S_{23}^2} (\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \frac{1}{S_{23}^2} (\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \frac{1}{S_{12}^2} (\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2) \geq 1 \quad (9)$$

3.2 FFF-CFRP 材料损伤本构关系

复合材料发生损伤后, 材料刚度特性会发生退化, 其承载能力会相应降低。根据 FFF-CFRP 材料损伤失效过程, 本文采用 Lee^[25] 三维瞬间退化模型, 将发生损伤后的材料刚度系数直接进行折减。

当纤维发生破坏时, 材料单元彻底失效, 无法再继续承载, 需要将刚度系数全部折减为 0, 并且将单元删除。当基体发生破坏时, 只影响材料 2 方向拉伸刚度、剪切刚度, 因此, 需要将刚度矩阵中 C_{22} 、 C_{12} 、 C_{23} 、 C_{21} 、 C_{32} 折减为 0, 其余刚度系数不变。刚度矩阵中 9 个独立的刚度系数的折减值 r 如下所示:

当发生纤维失效时:

$$[r] = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0] \quad (10)$$

当发生基体失效时:

$$[r] = [1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0] \quad (11)$$

3.3 VUMAT 材料子程序的编写

VUMAT 子程序是 ABAQUS/Explicit 显示动力分析模型的用户自定义材料接口, 本文通过

VUMAT 子程序编写 FFF-CFRP 材料的损伤失效准则和本构关系。首先在 ABAQUS 主程序中输入材料基础参数, 通过 VUMAT 子程序读取参数值, 并计算材料初始刚度矩阵。其次, 读取每一增量步的应变增量, 更新应变分量, 通过刚度矩阵计算应力分量。最后, 通过三维 Hashin 损伤失效准则检验单元是否发生损伤失效, 当发生纤维损伤失效时, 将单元删除。同时, 计算单元三个方向的拉伸比, 即求解变形梯度矩阵的特征根, 以此控制单元畸变程度, 当单元畸变程度过大时认为单元失效, 也需将其删除。如发生基体损伤失效, 则更新损伤状态变量, 并计算损伤刚度矩阵, 通过损伤刚度矩阵更新应力, 将应力进行重新分布, 直至该增量步不再产生新的损伤单元。图 10 为 VUMAT 子程序计算流程图。

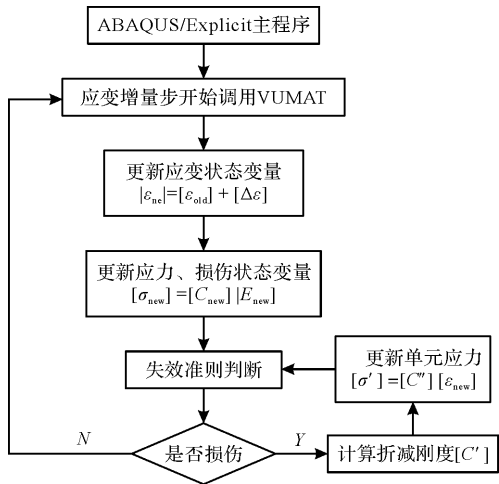


图 10 VUMAT 子程序计算流程图

Fig. 10 VUMAT subroutine calculation flow chart

3.4 夹片式锚具有限元模型的建立

模型采用规格 $\Phi 15.24$ 、抗拉强度 1 860 MPa 级的钢绞线, 夹片材料选用 20CrMnTi 钢, 材料弹性模量、泊松比及密度取值见表 9, 材料始终处于弹性阶段。锚环尺寸与张拉锚固试验相同, 材料参数采用试验所得 FFF-CFRP 材料力学性能参数, 并借助自编 VUMAT 材料子程序进行损伤失效模拟。

表 9 钢绞线、夹片弹性常数

Tab. 9 Elastic constant of steel strand and clip

钢绞线			夹片		
E/MPa	ν	$\gamma/\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	E/MPa	ν	$\gamma/\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$
1.95×10^5	0.3	1.102	2.07×10^5	0.25	7.8×10^3

钢绞线和夹片采用 C3D10M 四面体单元进行网格划分, 锚环采用 C3D8R 六面体单元进行网格划分。模型中钢绞线和夹片合并为一体, 不考虑二者之间的相对滑移。将夹片外表面与锚环锥孔

内表面的法向接触设置为“硬接触”。锚环底部边界条件设置为完全固定, 限制三个方向的平移和转动。在钢绞线张拉端逐步施加拉力, 采用 Explicit 准静态分析模块进行分析, 分析步时间长度为 0.001 s, 荷载采用均布荷载, 大小为 200 N/mm^2 , 平滑分析步加载。

3.4 有限元分析结果

图 11 给出了 FFF-CFRP 锚环破坏过程。可以看出, 随着荷载的增加, 锚环沿径向逐渐向外扩展, 并先从大孔径一侧开始破坏, 随后裂纹沿着锚环高度方向向小孔径一侧延伸, 直至贯通。纵向裂纹在锚环上均匀分布, 最终产生 3 条纵向贯通裂纹和 3 条短裂纹。将试验结果与有限元分析结果进行对比, 如图表 10 所示, 由于仿真分析只考虑了层内损伤, 因此未表现出分层扩展现象。

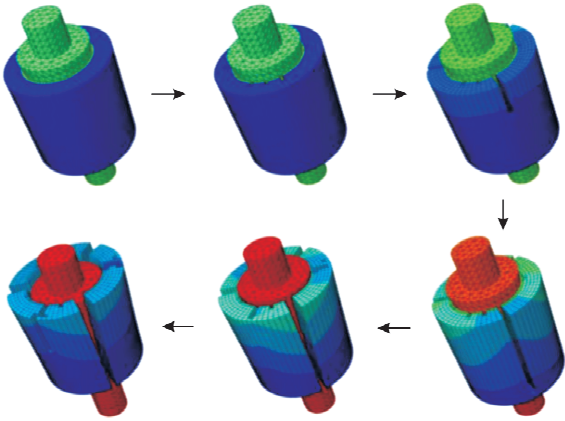


图 11 FFF-CFRP 锚环损伤破坏过程

Fig. 11 Damage process of FFF-CFRP anchor ring

图 12 为 FFF-CFRP 锚环结构有限元模拟的反力荷载-分析时间曲线。与试验结果对比可知, 实际锚环结构的承载能力较大, 有限元模拟结果偏小, 误差为 15%, 利用三维 Hashin 失效准则计算的材料损伤破坏点也小于实际情况, 说明有限元分析结果偏于安全。

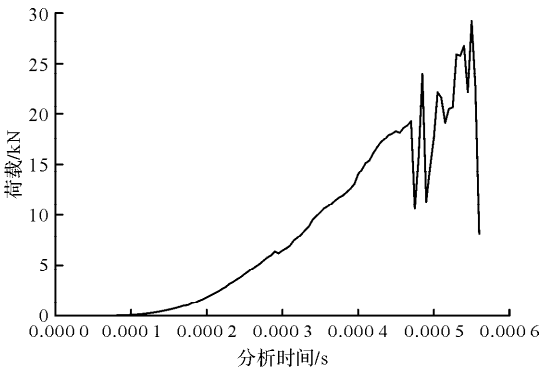


图 12 FFF-CFRP 锚环反力荷载-分析时间曲线

Fig. 12 Reaction load-analysis time curve of FFF-CFRP anchor ring

表 10 试验结果与有限元分析结果对比

Tab. 10 Comparison between test and simulation result

损伤失效模式		锚环承载力/kN		
试验	仿真	试验	仿真	误差
在高度方向纵向开裂、 靠近孔侧分层失效	高度方向 纵向开裂	31.3	26.6	15%

在 VUMAT 子程序中定义了非独立状态变量, 在 ABAQUS 主程序中表示为 $SDV1 \sim SDV4$ 。这 4 个数值分别表示纤维拉伸、纤维压缩、基体拉伸、基体压缩损伤状态, 当发生损伤失效时, 其数值变为 1。图 13 为删除单元的损伤状态变量数值。在损伤失效全过程分析中, 锚环大孔径一侧被删除单元的 $SDV1$ 数值最先达到 1, 随后, 沿着锚环高度方向的其余被删除单元 $SDV1$ 依次达到 1, 而 $SDV2$ 、 $SDV3$ 、 $SDV4$ 的数值均为 0, 证明了删除单元发生损伤失效的原因为纤维拉伸破坏, 即锚环结构纵向开裂是由纤维拉伸失效导致的。

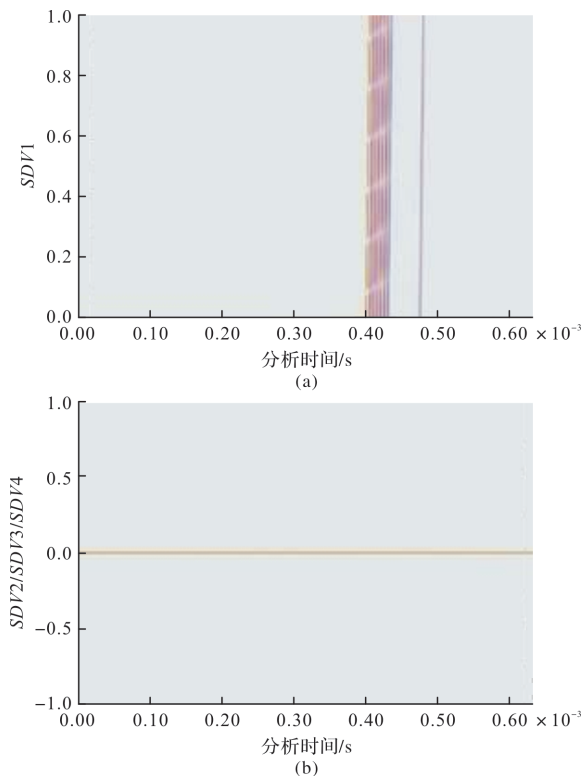


图 13 删除单元的损伤状态变量

Fig. 13 Damage state variable of delete elements

4 结论

本文通过 FFF-CFRP 锚环张拉锚固破坏试验研究了锚环损伤失效模式, 通过 FFF-CFRP 材料力学性能试验测得了 FFF-CFRP 材料力学性能参数, 建立了 FFF-CFRP 锚环层内损伤失效模型并开展了有限元分析, 得出了以下具体结论:

(1)在荷载作用下, FFF-CFRP 锚环发生了明显的层内损伤破坏;

(2)有限元模拟的锚环结构承载力小于试验结果, 利用三维 Hashin 失效准则计算的材料损伤破坏点也小于实际情况, 分析结果偏于安全;

(3)FFF-CFRP 锚环破坏是由纤维拉伸失效导致的, 可从增强纤维连续性、纤维性能、采用编织复合材料结构等方面优化 FFF-CFRP 材料特性。

参考文献 References

- [1] 郭瑞, 李承高, 咸贵军, 等. 碳-玻璃纤维混杂复合材料杆体的力学与耐久性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(2): 174-183.
GUO Rui, LI Chenggao, XIAN Guijun, et al. Study on mechanical and durability of carbon-glass fiber hybrid composite rod[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2022, 54(2): 174-183.
- [2] 蒲定, 王召, 刘晓彬, 等. 南海环境下乙烯基酯玻璃纤维复合材料拉伸性能[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(2): 159-163, 210.
PU Ding, WANG Zhao, LIU Xiao Bing, et al. Behaviour of glass fiber-reinforced vinyl ester composite in South China Sea environment[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2022, 54(2): 159-163, 210.
- [3] 唐通鸣, 张政, 邓佳文, 等. 基于 FDM 的 3D 打印技术研究现状与发展趋势[J]. 化工新型材料, 2015, 43(6): 228-230, 234.
TANG Tongming, ZHANG Zheng, Deng Jiawen, et al. Research status and trend of 3D printing technology based on FDM[J]. New Chemical Materials, 2015, 43(6): 228-230, 234.
- [4] MATSUZAKI R, UEDA M, NAMIKI M, et al. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in nozzle impregnation[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 23-58.
- [5] MELENKA G W, CHEUNG B K O, SCHOFIELD J S, et al. Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures[J]. Composite Structures, 2016, 153: 866-875.
- [6] CHACÓN J M, CAMINERO M A, NÚÑEZ P J, et al. Additive manufacturing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties[J]. Composites Science and Technology, 2019, 181: 107688.
- [7] GOH G D, DIKSHIT V. NAGALINGAM A P. et al.

- Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics[J]. *Materials & Design*, 2018, 137: 79-89.
- [8] JUSTO J, TÁVARA L, GARCÍA GUZMÁN L, et al. Characterization of 3D printed long fiber reinforced composites[J]. *Composite Structures*, 2018, 185: 537-548.
- [9] DICKSON A N, BARRY J N, MCDONNELL K A, et al. Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fiber reinforced polymer composites using additive manufacturing [J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 16: 146-152.
- [10] BLOK L G, LONGANA M L, YU H, et al. An investigation into 3D printing of fiber reinforced thermoplastic composites[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 176-186.
- [11] NING F, CONG W, QIU J, et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling[J]. *Composites Part B-Engineering*, 2015, 80: 369-378.
- [12] KARSLI N G, AYTAC A. Tensile and thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composites[J]. *Composites Part B-Engineering*, 2013, 51: 270-275.
- [13] 陈向明,姚辽军,果立成,等. 3D 打印连续纤维增强复合材料研究现状综述[J]. *航空学报*, 2021, 42(10): 174-198.
- CHEN Xiangming, YAO Liaojun, GUO Licheng, et al. 3D printed continuous fiber-reinforced composites; State of the art and perspectives[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2021, 42(10): 174-198.
- [14] KABIR S M F, MATHURK, SEYAMA FM. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites; History, mechanism, materials and properties [J]. *Composite Structures*, 2020, 232(1): 111476.
- [15] YOUNG D, WETMORE N, CZABAJ M. Interlayer fracture toughness of additively manufactured unreinforced and carbon-fiber-reinforced acrylonitrile butadiene styrene [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 508-515.
- [16] 胡艺伟,李亚智,李彪,等. 纤维增强聚合物基复合材料熔融堆积成型技术的研究进展及产品的力学性能[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(4): 979-996.
- HU Yiwei, LI Yazhi, LI Biao, et al. 3D printed fibre-reinforced polymer composites Review of the fused deposition modeling process and mechanical performance of products[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2021, 38(4): 979-996.
- [17] AL-ABADI H, THAI H-T, PATON-COLE V, et al. Elastic properties of 3D printed fiber-reinforced structures[J]. *Composite Structures*, 2018, 193: 8-18.
- [18] SWOLFS Y, PINHO S T. 3D printed continuous fiber-reinforced composites; Bio-inspired microstructures for improving the translaminar fracture toughness[J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 182: 107731.
- [19] O'CONNOR H J, DOWLING D P. Evaluation of the influence of low-pressure additive manufacturing processing conditions on printed polymer parts[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 21: 404-412.
- [20] 李鸿宇. 碳纤维网络增强阴离子聚合尼龙 6 复合材料的制备与性能研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2019.
- LI Hongyu, Preparation and performance study of carbon fiber network reinforced anionic polymerized nylon 6 composite materials[D]. Hunan: Hunan University, 2019.
- [21] ASTM. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials; ASTM D3039-2008 [S]. PA, USA: ASTM International, 2008.
- [22] ASTM. Standard test method for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by tensile test of a $\pm 45^\circ$ laminate; ASTM 3518-1994 [S]. PA, USA: ASTM International, 1994.
- [23] ASTM. Standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials with unsupported gage section by shear loading; ASTM D3410-2003 [S]. PA, USA: ASTM International, 2003.
- [24] HASHIN Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. *Journal of Applied Mechanics*. 1980, 47(2): 329-334.
- [25] LEE J D. Three-dimensional finite element analysis of damage accumulation in composite laminate[J]. *Computers & Structures*. 1982, 15(3): 335-350.

(编辑 郑晓龙 沈 波)