

含有分层损伤的薄壁碳纤维管件损伤性能分析

罗忠^{1,2,3}, 孙新宇^{1,2}, 于冰^{1,2}, 张承双⁴

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 3. 东北大学 佛山研究生创新学院, 广东 佛山 528312; 4. 西安航空复合材料研究所, 陕西 西安 710025)

摘要: 以卫星天线支撑结构中的薄壁碳纤维管作为研究对象, 针对管在运输、装配等过程中容易发生低能冲击产生的不可见的分层损伤, 研究含有损伤的薄壁碳纤维管的抗损伤性能. 采用ABAQUS实体单元建立了含有分层损伤的薄壁碳纤维管的有限元模型, 通过低能横向冲击实验对有限元模型进行了验证. 考虑管的实际工况, 研究纤维取向和分层位置对管的抗压性能的影响, 以及分层损伤对二次横向冲击的影响. 结果表明, 纤维取向越接近轴向, 分层损伤对管的抗压性能的影响越小. 只有在损伤位置处, 管的抗横向冲击损伤性能才会下降.

关键词: 薄壁碳纤维管; 分层损伤; 轴向压缩; 纤维取向; 横向冲击

中图分类号: V 214.8 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)05-0080-07

Damage Performance Analysis of Thin-Walled Carbon Fiber Tube Fittings with Delamination Damage

LUO Zhong^{1,2,3}, SUN Xin-yu^{1,2}, YU Bing^{1,2}, ZHANG Cheng-shuang⁴

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion Systems, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Foshan Graduate School of Innovation, Northeastern University, Foshan 528312, China; 4. Xi'an Aerospace Composites Research Institute, Xi'an 710025, China. Corresponding author: LUO Zhong, E-mail: zhluo@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Taking the thin-walled carbon fiber tubes in the support structure of satellite antennas as the research object, the damage resistance of thin-walled carbon fiber tubes with damage was investigated with respect to the invisible delamination damage generated by low-energy impacts that are prone to occur in the process of tube transporting and assembling. A finite element model of a thin-walled carbon fiber tube with delamination damage was developed using ABAQUS solid units, and the finite element model was validated by low-energy transverse impact experiments. Considering the actual working conditions of the tube, the effects of fiber orientation and delamination position on the compressive properties of the tube and the effect of delamination damage on the secondary transverse impact were investigated. The results showed that the closer the fiber orientation is to the axial direction, the smaller the effect of delamination damage on the compressive properties of the tube. The resistance of the tube to transverse impact damage decreases only in the position of the damage.

Key words: thin-walled carbon fiber tube; delamination damage; axial compression; fiber orientation; transverse impact

纤维增强复合材料具有密度低、比强度高、用于航空航天、汽车工程、船舶工程、土木工程、比模量高、易于加工成型等优良特性, 被广泛应用于体育器械等领域^[1]. 薄壁管件与碳纤维复合材料

收稿日期: 2023-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12272089, U1908217); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2224001-4, N2003013, N2303002); 航天复合材料重点实验室开放基金资助项目(2022JX04H014).

作者简介: 罗忠(1978—), 男, 内蒙古集宁人, 东北大学教授, 博士生导师.

结合可作为卫星结构的支撑结构,一般采用缠绕工艺成型.天线用薄壁管件采用碳纤维湿法缠绕而成,在使用中主要承受弯曲与压缩载荷^[2-3].但在薄壁碳纤维管件的生产、装配、运输等过程中,容易因低能冲击产生不可见损伤,这种损伤会影响管件的结构完整性,可能使管在工作过程中产生破坏性失效.所以,针对已损伤的薄壁碳纤维管件,研究其在实际工况下的抗损伤性能以及承载能力非常必要.

在复合材料管轴向压缩损伤方面,众多国内外学者对完好的碳纤维管件及其参与组成的结构进行了轴向压缩的研究.Li等^[4]设计了一种大型的碳纤维桁架结构并测试了其轴向压缩性能,设计的桁架结构具有良好的轴向压缩性能.Liu等^[5]提出了一种考虑纤维损伤的编织的碳纤维管的有限元模型.Hosseini等^[6]对不同厚度、铺层角度的碳纤维圆柱壳进行了轴向压缩实验,提出了一种基于参数的优化结构.Zhu等^[7]建立了不同几何截面的碳纤维管的有限元模型,研究了其轴向压缩的失效形式.Pan等^[8]采用micro-XCT表征方法研究了不同层结构的碳纤维复合管的弯曲损伤形态.Kim等^[9]研究评价了由碳、凯夫拉纤维和碳纤维混合纤维复合材料与环氧树脂组成的不同类型圆管的失效模式和能量吸收能力.而在轴向压缩方面的研究中,对含有分层损伤的薄壁碳纤维管的轴向压缩损伤性能的研究工作不够充分.

在复合材料管横向冲击损伤方面,Chen等^[10]对具有冲击前损伤的CFRP结构进行了残余耐撞性的实验-数值研究.Liu等^[11]研究了低速横向冲击下碳纤维增强聚合物管的性能和损伤,层压角度是影响裂纹形成方向的重要影响因素.Ge等^[12]研究了编织碳纤维增强厚复合板低速冲击下动态响应,分析了冲击能量与峰值力、最大位移和吸收能量等冲击性能之间的关系.肖杰等^[13]研究了碳纤维增强环氧树脂基复合材料传动轴的轴管在不同能级冲击下的损伤行为以及冲击后的剩余压缩性能.Wang等^[14]研究了碳纤维增强复合材料在低速冲击下的损伤和失效,提出了一种数值模型能够很好预测冲击载荷随时间的响应.Verma等^[15]研究了短碳纤维增强环氧复合管的损伤及失效分析,提出了一种基于ANSYS的有限元建模方法.Zhou等^[16]研究了不同编织层数的CFRP管的冲击损伤行为.Minak等^[17]研究了扭转载荷对圆柱形t300-碳/环氧树脂试件的横向冲击

损伤的影响.Jin等^[18]研究了编织复合管在中跨低速横向冲击载荷下的性能.

目前对含有损伤的薄壁碳纤维管件抗损伤性能的研究较少,理论求解计算复杂,而含有损伤的管件能否在卫星天线展开过程中保持其结构完整性,在轴向载荷的作用下损伤对管的承载能力的影响,对其参与残余损伤性能的研究都具有重要意义.

本文针对薄壁碳纤维管件在生产、装配等过程中因低能冲击产生的损伤,建立了含有损伤的薄壁碳纤维管有限元模型,针对管件可能的受载模式,对损伤后的薄壁碳纤维管件进行了剩余压缩性能以及二次冲击的损伤性能的研究,并研究了纤维取向和分层对管承载能力的耦合作用.

1 有限元模型及损伤判据

1.1 含分层损伤的薄壁碳纤维管有限元模型

目前大部分的损伤分析建模方式都是先进行冲击的仿真再进行压缩仿真分析,分析时间较长,建模复杂.本文建立了一种含损伤的薄壁碳纤维管的有限元模型,减少了建模的复杂性:采用实体(solid)模块进行建模,由于在低能冲击下,CFRP管的损伤主要发生在最外层,为了简化分析计算,通过截面划分将管件划分为6层实体层以及1层黏性层来反映最外层与管之间的分层失效.黏性层的属性为面作用力,管件铺层方式见表1.其中纤维层单元属性为8结点四边形面内显性三维实体单元SC8R,黏性层单元属性为8结点三维黏结单元COH3D8.压缩仿真中压缩平面选用的是离散性实体刚体平面,平面与管件之间的接触设置为表面与表面之间的接触,选用的摩擦系数为0.3.横向冲击仿真中支撑块与落锤均设置为刚体,落锤与管表面接触设置为“硬”接触.所建立的模型如图1所示.

表1 仿真模型铺层方式
Table1 Simulation model layup methods

仿真模型	铺层方式
FEM1	【±15°/0 ₂ °/±15°】
FEM2	【±30°/0 ₂ °/±30°】
FEM3	【±45°/0 ₂ °/±45°】

$$\varepsilon_{ft}^{\theta,f} = \frac{2G_{ft}}{X^T I}, \quad (10)$$

$$\varepsilon_{fc}^{\theta,f} = \frac{2G_{fc}}{X^C I}, \quad (11)$$

$$\varepsilon_{mt}^{\theta,f} = \frac{2G_{mt}}{Y^T I}, \quad (12)$$

$$\varepsilon_{mc}^{\theta,f} = \frac{2G_{mc}}{Y^C I}. \quad (13)$$

其中: G_i ($I = ft, fc, mt, mc$) 是对应失效模式的断裂能量; I 是元素的特征长度, 由相应元素体积的立方根计算得出.

将上述损伤判据写入子程序并与有限元仿真软件相关联, 通过用户自定义的输出变量表示管的损伤情况.

2 分层对轴向压缩损伤性能的影响

2.1 纤维取向对轴向压缩损伤性能的影响

分层损伤是发生在基质上的损伤行为, 而在碳纤维管的轴向压缩过程中, 纤维取向很大程度上影响了管在轴向压缩过程中承受载荷的主体: 当纤维取向接近轴向, 承受轴向载荷的主体主要是纤维和基质本身, 对基质与纤维的黏合程度要求不高; 而当纤维取向接近周向, 基质与纤维的黏合程度很大程度上会影响管的承载能力.

为了研究纤维取向对薄壁碳纤维管轴向压缩损伤性能的影响, 改变其铺层方式如表1所示, 分别进行压缩距离为 50 mm 的压缩仿真, 仿真结果见图3.

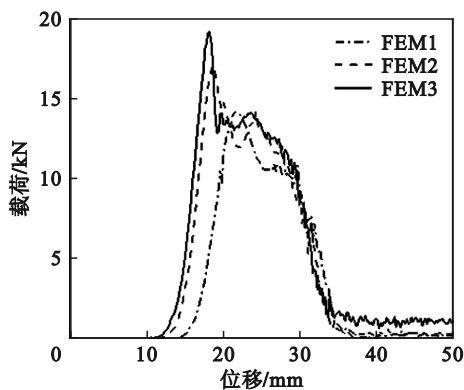


图3 不同铺层管的载荷-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves for different layered tubes

从图3中可以看出, 随着铺层角度从 15° 增加到 45°, 纤维取向越接近周向, 在相同的压缩条件下, 峰值载荷逐渐减小, 相对于接近轴向的 15° 铺

层, 30° 和 45° 铺层的峰值载荷分别下降了 11.2% 和 30.0%. 这表明纤维取向很大程度上影响了薄壁碳纤维管的轴向承载能力, 也就是说相同的分层在不同纤维取向的管上对管的损伤性能的影响程度大概率是不同的.

2.2 纤维取向和分层对于压缩损伤的耦合作用

考虑到碳纤维管承受轴向载荷能力随着纤维取向的不同而不同, 原因是不同纤维取向的碳纤维管的纤维丝和基质参与轴向压缩的主体不同. 同时也考虑到仿真压缩位移为 50 mm, 并未将整根管完全压缩, 所以通过有限元软件模拟了不同的铺层角度以及不同的分层位置对管的轴向压缩损伤性能的影响.

由图4仿真损伤结果可以看出, 随着铺层角度的增大, 管的压缩损伤出现更多的周向向外的堆叠, 这说明管在承受轴向压缩载荷时由于铺层的不同基质和纤维的失效模式会出现差异. 在添加了分层损伤的有限元模型中可以看出, 在 15° 的模型中分层出现了更多的纤维断裂; 而在 30° 和 45° 的模型中分层出现了更加严重的堆叠损伤, 这表明纤维取向和分层对于碳纤维管的压缩损伤具有耦合作用.

图5为相同压缩距离下 15° 和 30° 碳纤维管有限元仿真的载荷-位移曲线, 可以看出, 当分层损伤发生在位置1时, 管所能承受的最大轴向载荷基本不变, 说明此种纤维取向, 未在压缩位移范围内的局部分层损伤不会影响管的轴向承载能力. 而在损伤位置2处可以看出, 两种管都发生了明显的峰值载荷的下降, 出现载荷再次上升的现象是因为损伤位置压缩后, 未损伤部分也参与进来, 造成载荷的上升, 出现了第2个峰值载荷.

图6为 45° 碳纤维管的有限元仿真的载荷-位移曲线, 区别于 15° 和 30°, 在此种纤维取向, 分层发生在位置1处也使管承受的峰值载荷减小, 这说明更大的铺层角度下, 基质层的黏性在抵抗轴向压缩过程中参与更多, 而在管上出现的分层损伤会影响管的轴向承载能力. 这种峰值载荷的下降也表明分层损伤对碳纤维管的轴向压缩损伤性能的影响与管的纤维取向存在耦合作用: 纤维取向越接近轴向, 分层损伤对轴向压缩承载能力的影响越小; 反之, 纤维取向越接近周向, 分层损伤对轴向压缩承载能力的影响越大.

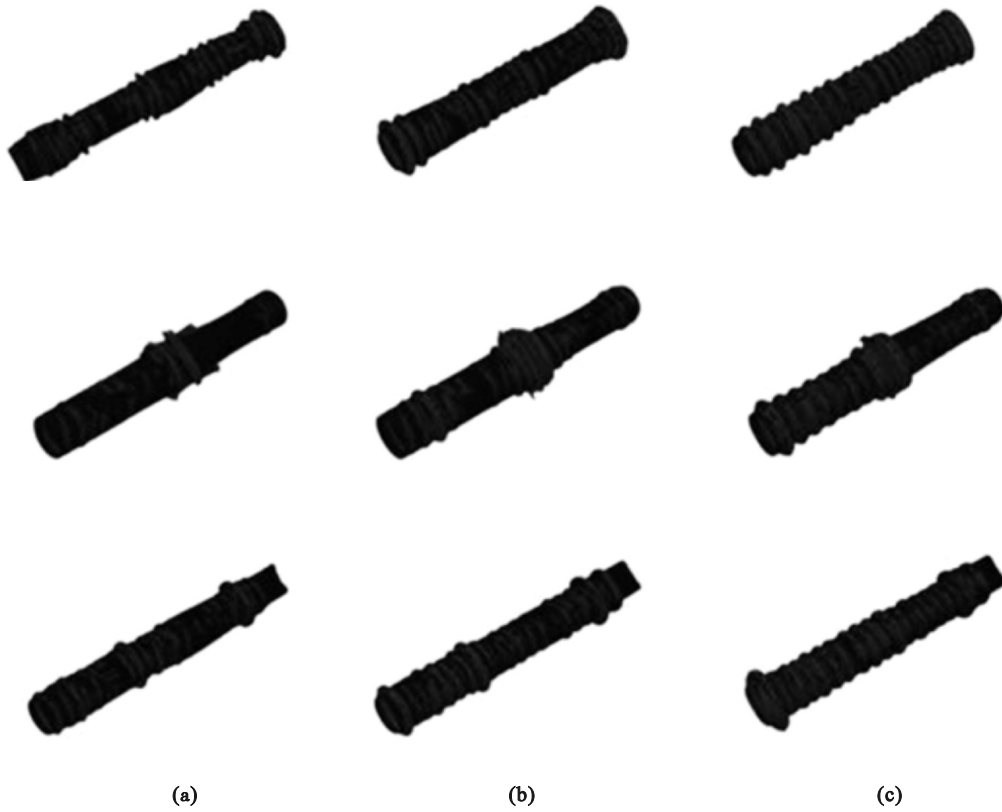


图4 不同纤维取向碳纤维管压缩对比

Fig. 4 Compression comparison of carbon fiber tubes with different fiber orientations (a)—15°; (b)—30°; (c)—45°.

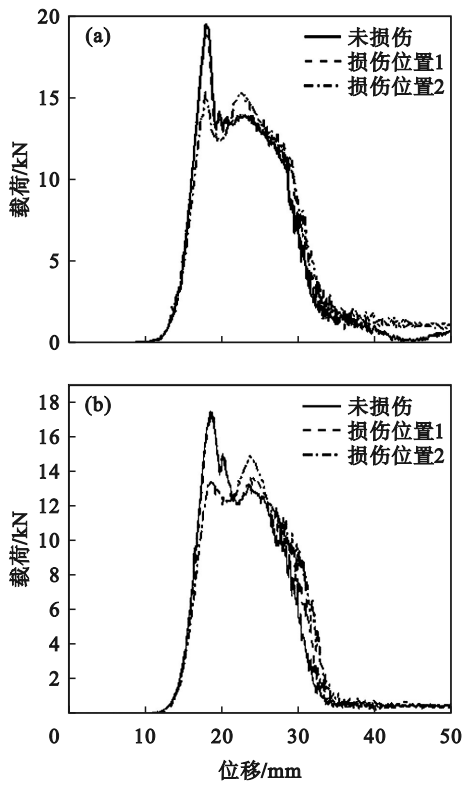


图5 压缩过程载荷-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves during compression (a)—FEM1; (b)—FEM2.

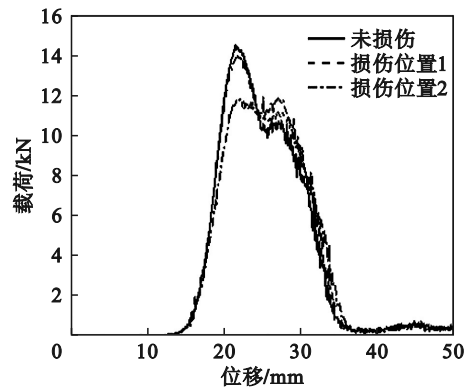


图6 FEM3压缩过程载荷-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of FEM3 compression process

3 分层损伤对横向冲击损伤性能的影响

3.1 分层损伤对横向冲击影响

对于横向冲击损伤,纤维和基质损伤是通过Hashin失效准则来确定的.层间分层损伤通过Linde失效准则确定.

当材料符合失效标准时,它将进入损伤演化阶段.参考文献[17],采用双线性本构律.该定律由中间损伤变量 d_i 控制.

$$d_I = \frac{\varepsilon_f^f(\varepsilon - \varepsilon_f^0)}{\varepsilon(\varepsilon_f^f - \varepsilon_f^0)}, I \in (\text{ft}, \text{fc}, \text{mt}, \text{mc}), \varepsilon_f^0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_f^f, (14)$$

$$\varepsilon_f^f = \frac{2G_{fc}}{\sigma_{\text{Imax}} L_c}, I \in (\text{ft}, \text{fc}, \text{mt}, \text{mc}), \sigma_{\text{Imax}} \in (X_t, X_c, Y_t, Y_c). (15)$$

其中: ε_f^f 为最终失效应变; G_{fc} 为能量释放速率; L_c 为元素的特征长度, 引入以减少网格依赖性.

在对含有分层损伤管横向冲击的仿真模拟中, 主要考虑 3 个冲击位置的响应, 分别为正对损伤位置的冲击位置 1, 偏离损伤位置的冲击位置 2 以及损伤位置背面的冲击位置 3, 如图 7 所示.

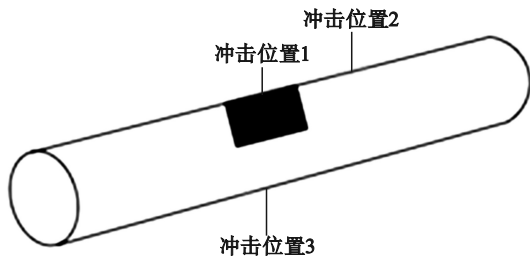


图 7 3 个冲击位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of three impact positions

输出冲击过程中的载荷-时间曲线如图 8 所示, 由于考虑管在低能冲击下的响应, 仿真设定的冲击能量为 2 J. 可以看出, 仅在正对分层损伤位置发生冲击才会使曲线出现明显的差异. 在正对分层损伤位置产生冲击, 冲击产生的峰值载荷会出现明显的下降, 冲击损伤的持续时间会略有增加, 这说明冲击位置处刚度略有降低. 而未含损伤的管的冲击损伤性能基本不变, 这也体现了复合材料良好的各向异性.

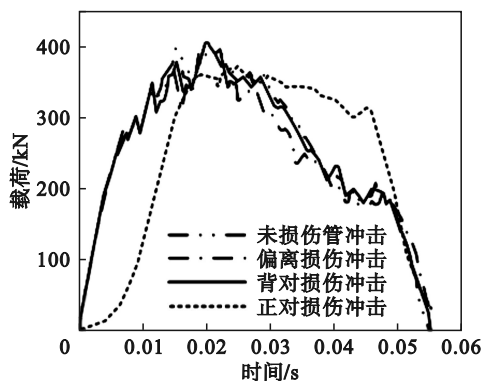


图 8 不同冲击位置的载荷-时间曲线

Fig. 8 Load-time curves for different impact positions

3.2 模型验证

利用落锤实验所得的载荷-时间曲线与仿真对比, 验证仿真模型的正确性. 落锤实验设置见

图 9, 通过改变落锤的高度改变冲击能量的大小. 载荷由锤头后力传感器测得, 位移由激光位移传感器测得. 落锤质量为 15.6 kg.

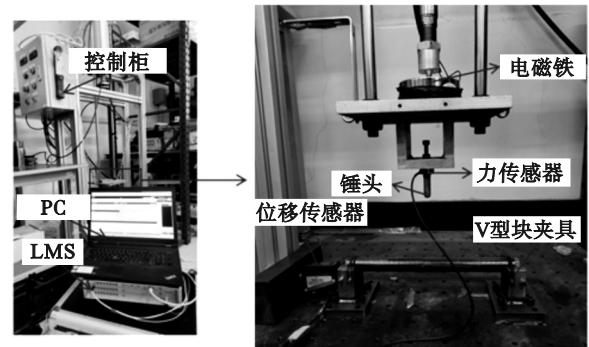


图 9 落锤实验设置

Fig. 9 Drop hammer experimental setup

图 10 为所得的 2 J 冲击能量下实验和仿真的载荷-时间曲线对比图, 实验和仿真曲线都表明: 在较低的能量冲击下, 管在受冲击后很短时间内载荷急速上升达到峰值, 然后依靠弹性将落锤反弹, 载荷下降. 从实验和仿真曲线中都未观察到明显的载荷急剧下降的现象, 说明管在冲击过程中大部分为弹性形变, 损伤微小. 在 0.04 s 左右仿真曲线载荷急剧下降, 而在实验曲线中并未观察到这一现象, 原因是在落锤实验过程中, 落锤质量较大且释放过程为电磁铁吸附. 很小的偏移导致冲击时不对中, 会造成落锤在冲击结束后反弹不明显, 沿着管壁滑落, 这也造成冲击响应时间比仿真时间长, 载荷下降过程中实验载荷减小较慢, 与仿真存在一定的差异. 但实验和仿真所得的曲线总体趋势基本一致, 说明建立的有限元模型可以很好地反映薄壁碳纤维管横向低能冲击响应.

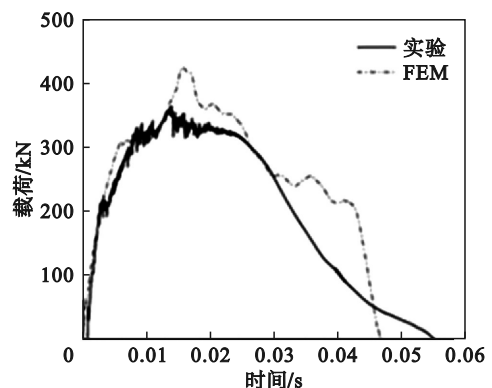


图 10 2 J 冲击能量下载荷-时间曲线

Fig. 10 Load-time curves under 2 J impact energy

4 结 论

1) 建立了含有分层损伤的薄壁碳纤维管件有限元模型. 将损伤判据写入子程序与仿真关联并进行了不同纤维取向的轴向压缩仿真, 发现纤维取向很大程度上影响了管的损伤模式, 纤维取向越接近轴向, 管的轴向承载能力越高, 峰值载荷越大.

2) 通过对不同纤维取向和不同分层位置的薄壁碳纤维管的有限元仿真, 发现分层损伤对不同纤维取向管的轴向承载能力的影响程度不同, 纤维取向越接近轴向, 分层对管的轴向压缩损伤性能影响越小. 而且, 局部分层损伤所在的位置也会对轴向压缩损伤性能产生影响.

3) 通过对含有分层损伤的薄壁碳纤维管进行不同位置的横向冲击仿真, 发现含有分层损伤的管只有在对损伤位置进行冲击时, 才会出现峰值载荷下降、损伤时间进程增加的现象. 而对其余未发生损伤的位置的冲击仿真结果与未损伤管无明显差别.

参考文献:

- [1] Meng F, McKechnie J, Turner T, et al. Environmental aspects of use of recycled carbon fiber composites in automotive applications [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(21): 12727-12736.
- [2] Tang S F, Hu C L. Design, preparation and properties of carbon fiber reinforced ultra-high temperature ceramic composites for aerospace applications: a review[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, 33(2): 117-130.
- [3] Aamir M, Tolouei-Rad M, Giasin K, et al. Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: a review [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105: 2289-2308.
- [4] Li S P, Chen W J, Chen L L, et al. Structural design and axial compression test of novel carbon-fiber-reinforced polymer truss supporting rear connection-ring [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 185: 110623.
- [5] Liu T, Wu X Y, Sun B Z, et al. Investigations of defect effect on dynamic compressive failure of 3D circular braided composite tubes with numerical simulation method [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 160: 107381.
- [6] Hosseini S M, Shariati M. Experimental analysis of energy absorption capability of thin-walled composite cylindrical shells by quasi-static axial crushing test [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 125: 259-268.
- [7] Zhu G H, Sun G Y, Li G Y, et al. Modeling for CFRP structures subjected to quasi-static crushing [J]. *Composite Structures*, 2018, 184: 41-55.
- [8] Pan Z X, Ma H, Wu Z Y, et al. Micro-XCT characterization and numerical analysis of bending damage mechanism in carbon fiber plain, twill and winding composite tubes [J]. *Fibers and Polymers*, 2020, 21: 874-897.
- [9] Kim J S, Yoon H J, Shin K B. A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fibers [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(4): 198-207.
- [10] Chen D D, Sun G Y, Meng M Z, et al. Residual crashworthiness of CFRP structures with pre-impact damage: an experimental and numerical study [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 149: 122-135.
- [11] Liu Y, Zhuang W M, Wu D. Performance and damage of carbon fibre reinforced polymer tubes under low-velocity transverse impact [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 151: 106727.
- [12] Ge X X, Zhang P, Zhao F, et al. Experimental and numerical investigations on the dynamic response of woven carbon fiber reinforced thick composite laminates under low-velocity impact [J]. *Composite Structures*, 2022, 279: 114792.
- [13] 肖杰, 施涵, 余许多, 等. 碳纤维增强环氧树脂基复合材料轴管的低速冲击失效机制及剩余压缩性能 [J]. *复合材料学报*, 2021, 38(11): 3640-3651.
(Xiao Jie, Shi Han, Yu Xu-duo, et al. Failure mechanisms and residual compression performance of carbon fiber reinforced epoxy composite shaft tubes subjected to low velocity impact [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(11): 3640-3651.)
- [14] Wang W Z, Wan X P, Zhou J, et al. Damage and failure of laminated carbon-fiber-reinforced composite under low-velocity impact [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2014, 27(2): 308-317.
- [15] Verma A, Mandal A, Sreehari D. Damage and failure analysis of short carbon fiber reinforced epoxy composite pipe using FEA [C]// *Advances in Applied Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICAMER 2019*. Singapore: Springer, 2020: 313-320.
- [16] Zhou H L, Hu D M, Gu B H, et al. Transverse impact performance and finite element analysis of three dimensional braided composite tubes with different braiding layers [J]. *Composite Structures*, 2017, 168: 345-359.
- [17] Minak G, Abrate S, Ghelli D, et al. Low-velocity impact on carbon/epoxy tubes subjected to torque-experimental results, analytical models and FEM analysis [J]. *Composite Structures*, 2010, 92(3): 623-632.
- [18] Jin Y L, Wu Z Y, Pan Z X, et al. Numerical and experimental study on effect of braiding angle on low-velocity transverse punch response of braided composite tube [J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2020, 29(4): 667-686.