

# Comparative Analysis of Impact Test and Simulation on CFRP Tube

Lou Lei<sup>1</sup>, Lu Shen<sup>1</sup> & Guo Shuwen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> China Automotive Technology and Research Center, No.68, East Xianfeng Road, Dongli District, Tianjin, 300300  
Email: loulei@catarc.ac.cn

**Abstract:** CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) has excellent physical and chemical properties. Because of its lightweight and high strength material characteristics, it is becoming more and more popular in the automotive industry. This paper designed the impact bench and carried out the dynamic impact test of the circular tube, studied the modeling method of carbon fiber and established the simulation model of the impact test, carried out the comparison and analysis of the simulation test and the actual test, and found a method of modeling of the composite material and the control method of the related parameters. Finally, the test was completed and the test was completed. The accuracy of the CFRP material simulation modeling method can be applied in the vehicle simulation development of vehicle structure with carbon fiber materials

**Keywords:** CFRP; Impact; Sled Test; Simulation modeling; Control parameters

## CFRP 圆管冲击试验与仿真对比分析

娄磊<sup>1</sup>, 路深<sup>1</sup>, 郭树文<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国汽车技术研究中心, 天津市东丽区先锋东路 68 号, 300300  
Email: loulei@catarc.ac.cn

**摘要:** CFRP (碳纤维增强复合材料) 具有优异的物理性质和化学性质, 由于其轻量化、高强度的材料特性优势, 在汽车行业受到越来越高的青睐。本文设计了冲击台架并进行了圆管动态冲击试验; 研究了碳纤维建模方法并建立了冲击试验的仿真模型, 进行了仿真试验与实际试验的对比分析, 寻找到一种复合材料建模方法及相关参数控制方法; 最终完成了试验对标, 验证了 CFRP 材料仿真建模方法的准确性, 可在碳纤维材料构建车辆结构的车型仿真开发中进行工程应用。

**关键词:** 碳纤维增强复合材料; 碰撞; 台车试验; 仿真建模; 控制参数

## 1 引言

CFRP 材料, 即碳纤维增强复合材料, 具有非常优异的物理性质和化学性质。物理性质方面, 兼具碳材料强抗拉力和纤维柔软可加工性两大特性。化学性质方面, 对一般的有机溶剂、酸、碱都具有良好的耐腐蚀性, 不溶不胀、不会疲劳、不会生锈、热稳定性好。

碳纤维复合材料广泛应用在火箭、导弹和高速飞行器等航空航天领域。碳纤维由于其质量小, 所以动力消耗少, 可节约大量燃料。2013 年面世的 A350 超宽客机, 复合材料比重将达 52% 左右, 预计百公里油耗只有 2.5L/人, 几乎可与小汽车媲美。

在一般工业制造领域中, 特别是汽车行业, 碳纤维材料轻量化、高强度的特点, 能够有效解决汽车轻量化和碰撞安全性之间的矛盾关系, 并且随着碳纤维制造工艺的成熟, 其成本也得到了有效控制, 因此现已成为汽车制造商青睐的材料。近年来电动汽车发展迅猛, 但是电池本身的能量密度低的问题, 使电池重量与续航里程成为新的矛盾, 车身轻量化成为解决续航里程低的必经之路。碳纤维应用于电动汽车上能抵消动力电池带来的额外重量, 在降低车重的同时, 延长了车辆的续航里程, 并提高了车辆的驾驶操控性的和安全性。BMW i3 的全新车身结构, 采用的是 CFRP 车舱和铝合金底盘, 因此质量比传统电动车轻了 300 kg 左右<sup>[1-5]</sup>。

虽然碳纤维材料具有种种优势,但在汽车行业尚属起步阶段,该材料在车型开发 CAE 仿真建模中尚有困难,特别是碰撞有限元仿真建模中,碳纤维材料卡片的存在方法不统一,精度不高的问题。本文针对常用的碳纤维管型材,通过材料试验、台架动态冲击试验、仿真模型分析,研究了材料卡片、模型建模方法及相关参数控制方法。并最终通过对标试验,验证了模型精度和方法的准确性。

## 2 试验设计

### 2.1 冲击台架设计

材料在冲击下的力学响应对应于车辆前端吸能装置的选择与布置起到至关重要的作用,车辆吸能装置会用到各种不同的材料以及结构。吸能材料的力学性能需要通过试验进行验证与研究。此外,在车辆开发过程中,常常会用到计算机辅助设计,不同吸能单元力学性能的对比分析成为仿真的重点工作,仿真与实际结果的相似程度将决定后续设计的成功与否。然而,现阶段,在材料吸能特性的研究上,多数企业采用的是万能材料试验机对特定材料的标准件进行拉伸或压缩试验。然而,当材料被加工成不同截面形状、尺寸,以及在具有不同内部结构后,其力学特性会有很大的变化,通过材料试验机获得的参数不能很好的反映材料在不同结构状态下的吸能特性。并且,材料试验机所能提供拉伸(压缩)的速度具有一定的局限性,无法获得材料在不同冲击速度下的响应以及溃缩特性。

所以应用于车身吸能件的材料,更多注重的是冲击力学性能。本文设计了一组动态冲击试验,用于测试在高速冲击状态下,CFRP 材料的力学性能。并以静态试验为基础,进行仿真模型与动态冲击试验对比分析。

本文借助中国汽车技术研究中心模拟碰撞试验室的台车进行试验。在台车上设计一款材料试验台架,用于装夹试验材料以及获得材料的力学参数和动态响应。试验中,我们将模拟配重块冲击所需研究的材料,通过配重块在冲击过程中的加速度、材料的溃缩量以及变形形式来获取材料的吸能特性。

图 1 是材料试验台架示意图。直线导轨 4 通过螺栓与试验台架体 1 固连,滑动台面 3 可以在直线导轨 4 上自由滑动,台面上可安装配重块以调节滑块质量。试验时,将试验台架 1 通过螺栓固定在台车上,用四爪卡盘 7 将试验材料 5 卡紧,并依据台车的加速度距离预留出试验材料端面与材料冲击面 3.4 之间的距离。在滑动台后端面贴加速度传感器,用于采集试验中滑动台 3 的加速度。

材料试验台架前端橡胶保护块 6 的长度为 160mm,用于防止材料失稳后滑动台面直接与四爪卡盘发生碰撞,参考橡胶块的长度(试验材料不能短于橡胶块长度),试验材料的长度应不短于 170mm。以 250mm 长的吸能管为例,其中卡盘中长度为 150mm,自由段长度为 100mm。

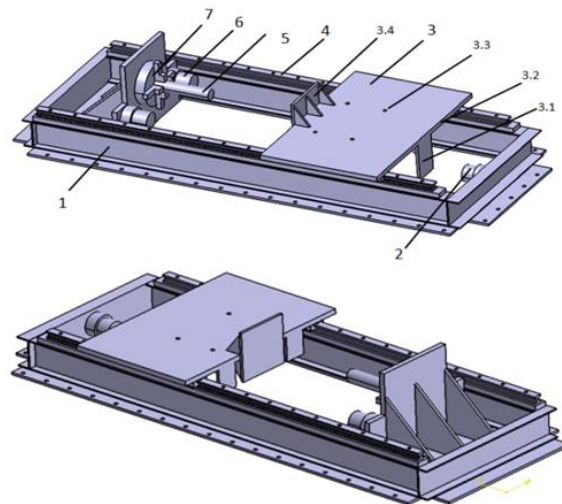


Figure 1. Schematic diagram of impact test stand

图 1. 冲击试验台示意图

试验中，将试验台在台车上固定好，在滑动台架后端面对称的位置处贴 2 片传感器，用于检测滑动台面在碰撞时是否发生绕台面法线方向的旋转，即当两传感器数据一致时，认为没有发生旋转，当两传感器数据有较大的偏差时，认为发生了旋转，需要重新调整直线导轨和滑块的相对位置。

在材料试验台架体侧面贴有 3 个标识点，间隔为 50mm，用于高速摄像采集位移数据，计算在冲击过程中台架的冲击速度。同理，在滑动台的侧面也贴有 3 个标识点，间隔 50mm，用于采集滑动台块的位移和速度，如图 2 所示。在试验结束后，可以通过传感器获得滑动台面的加速度曲线。将加速度曲线进行积分即可获得速度曲线。

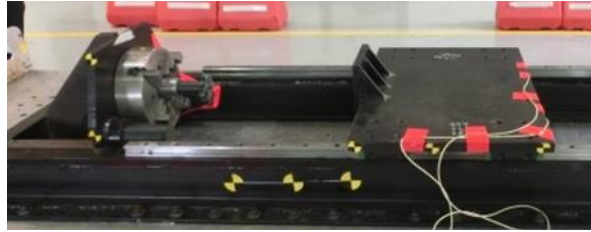


Figure 2.impact test stand

图 2.冲击试验台

进行试验时，我们希望滑台处于恒定速度对材料进行冲击。因此，在设置碰撞曲线时，前期(碰撞前)处于加速状态，后期(碰撞时)，台车处于恒定速度阶段。

台车加速度曲线和速度曲线如图 3 所示。台车加速度阶段的加速度为正弦波形，通过积分可以得到台车的加速距离，同时也是试验材料端面与材料冲击面之间的预留距离。计算公式(1)(2)如下：

$$V(t) = \int_0^t a(t)dt \quad (1)$$

$$S(t) = \int_0^t V(t)dt \quad (2)$$

其中， $a$  为台车加速度， $V$  为台车速度， $S$  为台车位移。

设置一条正弦加速度波形(图 3(a)加速度波形)，从图 3(b)的速度曲线中可以看到在 50ms 时，台车的速度达到了 20km/h，二次积分可得台车的加速距离为 140mm，因此材料端面和碰撞冲击面之间的预留距离至少应为 140mm。

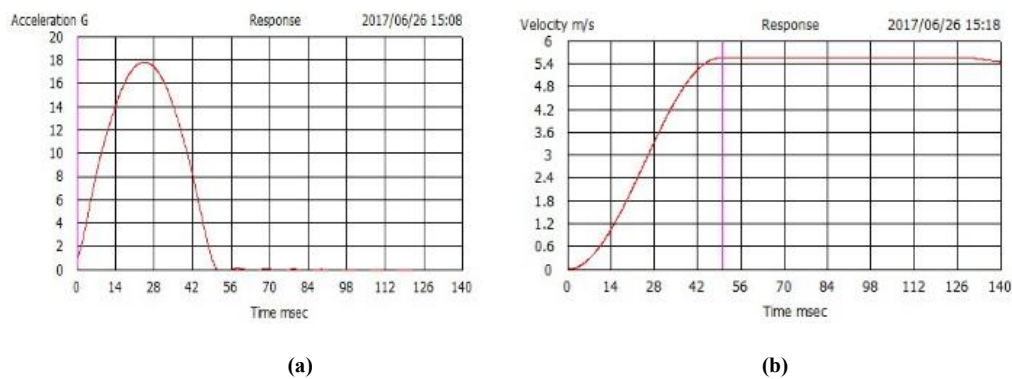


Figure 3.(a)curve:Acceleration (b)Velocity

图 3. (a) 加速度曲线 (b) 速度曲线

## 2.2 试验样件

完成冲击台架的设计和安装的准备工作后,接着进行 CFRP 圆管的动态冲击试验。本文一共设计了三组动态冲击试验,试件均为长度  $L=220\text{mm}$ ,直径  $D=30\text{mm}$  的圆管,分别标号 A, B, C, 试件厚度分别为 1.95mm, 2.05mm, 2.05mm, 尺寸如图 4 所示。

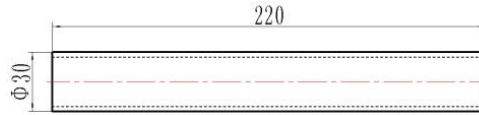


Figure 4. Dimensions of round tube specimen

图 4.圆管试件尺寸

将 CFRP 圆管安装在台车四爪卡盘中间并预紧。然后给台车施加如图 3 中的加速度曲线,最终使台车速度达到 20km/h;在此过程中,位于台车滑轨上的滑动台块处于一直处于静止状态。在台车速度达到 20km/h 后,便以恒定速度运动,接着安装在台车上的 CFRP 圆管与滑轨上的滑动台块碰撞,最终滑动台块的速度达到或者超过 20km/h。滑动台块上的加速度传感器会采集在碰撞过程中滑动台块的加速度-时间波形,试验重复三次,分别会得到三条加速度波形,得到的波形可以用于仿真模型中的对比分析。

## 2.3 圆管碰撞结果

碳纤维复合管通过复杂的损伤机制(包括纤维断裂、基质裂解、分层和摩擦)来吸收这种冲击能量。随后的粉碎形态一般可分为三种模式之一:(1)微观结构层面上材料的顺序破碎模式,(2)与横向撕裂相结合的连续叶片的分离模式,以及(3)渐进式折叠模式,类似于在金属管折叠压溃的方式。

试验中,纤维管破碎后的碎屑楔又导致形成主要的壁内分层,将管壁分成两个厚度相当的层压板,一层向内弯曲,另一层向外弯曲。碳纤维管件结构破坏模式宏观上一般分为整体屈曲,局部屈曲,断裂和连续破碎的四种,其中只有渐进式破碎导致高的比能吸收。破碎模式又可分为横向剪切,层板弯曲和局部屈曲,尤其是前两种的组合导致大多数破碎管件表现出脆性压裂行为。

试验样品 A/B/C 碰撞后结果均如图 5 所示。结合上文分析可知,碳纤维管的主要损伤形式为纤维与基体组织的渐进式破碎,碳纤维管壁分层失效,纤维束的横向撕裂和纤维叶片的分离模式。分离后的纤维叶片一部分向内弯曲,一部分向外弯曲。



Figure 5. Pipe collision results

图 5.圆管碰撞结果

## 2.4 试验数据结果分析

碳纤维管碰撞完成后，可以从安装在滑动平台上的加速度传感器中获得滑台的加速度-时间信息，如图 6 所示。因为复合材料的是失效形式与金属材料的失效形式不同，复合材料在损伤过程中主要为纤维及基体的撕裂和破碎，没有形成褶皱，所以在加速度-时间曲线中可以看到，没有形成较高的波峰和波谷，只有由于材料失效造成的小幅波动。

经分析可知，试件 C 的碰撞加速曲线偏差较大，A、B 加速度曲线相近，所以本文选择试件 B 的加速度-时间曲线作为仿真模型的对标结果。

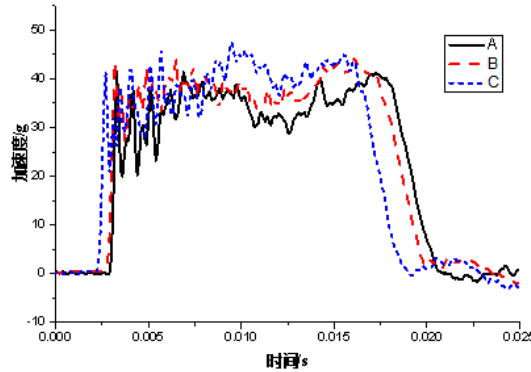


Figure 6.curve:Acceleration-time

图 6 滑台加速度-时间曲线

## 3 仿真方法分析

### 3.1 接触类型分析

接触类型“contact\_automatic\_surface\_to\_surface\_tiebreak”用于表示复合管的几何模型的内层和外层之间的粘合。对于最初接触的节点，Tiebreak 是活跃的。当满足以下失效标准时，会发生这些捆绑之间的粘合失效,如式 (3) 所示：

$$\left[ \frac{|\sigma_n|}{NFLS} \right]^2 + \left[ \frac{|\sigma_s|}{SFLS} \right] \geq 1 \quad (3)$$

其中  $\sigma_n$  和  $\sigma_s$  分别作用于界面表面的正应力和剪切应力，而 NFLS 和 SFLS 分别是失效时的正常拉伸和剪切应力。模拟管壁层之间的初始粘合的接触类型仅在接合失效前才起作用，失效后由“erod-ing\_surface\_to\_surface”接触类型替代。

在复合管和刚性墙之间使用“contact\_automatic\_nodes\_to\_surface”。

### 3.2 材料坐标系建立

本文选择在\*MAT\_54 材料中定义材料坐标系的方法，选择卡片中的参数 APOT=0.0。

在仿真过程中， $t>0$ ，随着单元的旋转、变形等变化，单元的材料坐标系也会随之改变。材料坐标系的变动对面内剪切及单元沙漏变形敏感，敏感程度跟单元坐标系的建立形式有密切关系。为了降低上述敏感性，特引入\*CONTROL\_ACCURACY，壳单元、厚壳单元，INN=2，体单元，INN=3。

### 3.3 失效参数控制

复合材料本构模型中失效参数对于模型准确度有很大影响。常用于复合材料失效准则是 Tsai-Wu 失效准则, Chang-Chang 失效准则和 Hashin 失效准则。本文选用 MAT54 定义碳纤维材料。

在 MAT54 中可以设置失效应变。失效应变设置包括纤维张力的最大应变(DFAILT), 纤维压缩的最大应变(DFAILC), 拉伸或压缩中基质应变的最大应变(DFAILM), 最大张力剪切应变(DFAILS)等。当 DFAILT=0 时, 默认采用 Chang-Chang 失效准则。本文选用 DFAILT = 0。

在没有这些参数的情况下, 有效的破坏应变 EFS 会在失效中起到控制作用。该参数的合理值不仅受材料本身的影响, 而且与单元的尺寸有关, 需要对此参数进行微调。本文设置 EFS=0.8。

在 MAT54 中有一些参数没有明确的物理意义, 即纯粹的数学方法, 或在试验中无法测量。它们需要根据材料和试验过程进行试错校准。这些参数包括非线性项 ALPH 的剪切应力参数, 拉伸纤维模式 BETA 的剪切项加权因子, 矩阵压缩破坏后的纤维拉伸强度降低系数 FBRT, 以及基体压缩后失效的纤维抗压强度降低因子 YCFAC[8]。这些参数对仿真结果没有明显的影响。本文取 BETA=0.5, FBRT=1.0, YCFAC=3.0。

通过设置合理的 TFAIL 值可以删除过度变形的元素。当 TFAIL 小于或等于 0 时, 根据时间步长不会删除元素; 当  $0 < \text{TFAIL} \leq 0.1$  时, 当时间步长小于给定值时, 元素被删除; 当  $\text{TFAIL} > 0.1$  时, 当当前时间步长和初始时间步长小于给定值时, 元素被删除。本文通过不断调试, 最终确定  $\text{TFAIL}=0.35$ 。

SOFT 和 SOFT2 分别表示纤维并联失效和纤维正交失效的降低系数。SOFT 的值对模拟结果的峰值载荷和平均载荷有显著影响。然而, 经过多次对不同的 SOFT 值试验, 发现当使用 Chang-Chang 失效准则时, SOFT 值仅对平均载荷有显著的影响。本文调试发现, 取值  $\text{SOFT}=0.7\sim 0.9$  时, 模型准确度均较好, 最终取值  $\text{SOFT}=0.9$ 。

## 4 圆管仿真模型建立

### 4.1 碰撞过程对比分析

根据生产厂家提供的基本参数建立纤维管仿真模型, 并通过调整失效参数, 达到较为理想的准确度。

对比试验结果, 如图 7 所示, 模型较好的反映了碳纤维管的变形特征。由仿真结果可以看到, 纤维为部分向外翻折, 部分向内翻折, 并出现了纤维层的撕裂和分离, 这与实际试验结果较为接近。

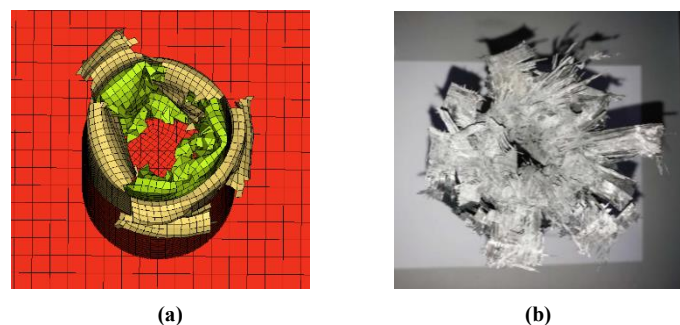


Figure 7. (a)CAE model (b)Solid test

图 7.(a)CAE 模型 (b)实体试验

### 4.2 试验曲线对比分析

由于在试验过程中采集的加速度受到其他干扰源影响, 波动较为明显, 因此, 需要对曲线进行适当的滤波, 以获得较为明显的曲线特性。本文选择 CFC60 等级的频率进行滤波, 如图 8 所示, 其中红色虚线为仿真试验加速度曲线, 黑色实线为施加动态冲击试验曲线。

将仿真模型与实际试验的加速度曲线进行对比可知, 两条曲线均有二个波峰, 初始碰撞的曲线斜率, 持续加速度的平均值和碰撞结束阶段的曲线斜率三者均较为一致。所以仿真模型与实际试验曲线大体趋势相同, 仿

真模型有效。

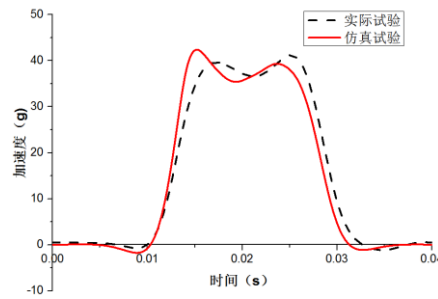


Figure 8. Matching curve between simulation test and actual test

图 10 仿真试验与实际试验对标曲线

## 5 小结

(1) 本文设计了一种专门用于动态冲击试验的台架，对 CFRP 材料圆管进行动态冲击试验，提取台架滑台的加速度-时间曲线。

(2) 本文详细分析了碳纤维铺层建模的方法，研究材料参数各个控制参数的意义和影响。

(3) 通过调整各个参数，建立了碳纤维圆管模型，并通过与实际试验的对比分析，验证了仿真模型的有效性。

CFRP 材料建模方法较多，后续研究中，还需更多探索。另外，关于 CFRP 材料在车身上的应用还需更多研究加以验证。

## 参考文献

- [1] Hosseinzadeh R, Shokrieh M M, Lessard L B. Parametric study of automotive composite bumper beams subjected to low-velocity impacts[J]. Composite Structures, 2005, 68(4):419-427.
- [2] Davoodi M M, Sapuan S M, Ahmad D, et al. Concept selection of car bumper beam with developed hybrid bio-composite material[J]. Materials & Design, 2011, 32(10):4857-4865.
- [3] Wang A, Crossman F. Initiation and growth of transverse cracks and edge delamination in composite laminates part 1. An energy method. J Compos Mater 1980;14(1):71 - 87.
- [4] Saito H, Takeuchi H, Kimpara I. A study of crack suppression mechanism of thin-ply carbon-fiber-reinforced polymer laminate with mesoscopic numerical simulation. J Compos Mater 2014;48(17):2085 - 96.
- [5] Luo H, Yan Y, Zhang T, et al. Progressive failure numerical simulation and experimental verification of carbon-fiber composite corrugated beams under dynamic impact[J]. Polymer Testing, 2017, 63.
- [6] Mamalis A G, Manolakos D E, Ioannidis M B, et al. The static and dynamic axial collapse of CFRP square tubes: Finite element modelling[J]. Composite Structures, 2006, 74(2):213-225.
- [7] 李贝. 纤维增强型复合材料保险杠轻量化设计与优化[D]. 湖南大学, 2016.
- [8] Yu H Y, Chen S. Numerical Simulation of CFRP Thin-Walled Tubes Subjected to Quasi-Static Axial Crushing[C]// WCX™ 17: SAE World Congress Experience. 2017.
- [9] Sun G, Xu F, Li G, et al. Crashing analysis and multiobjective optimization for thin-walled structures with functionally graded thickness[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 64(64):62-74.
- [10] Yu H Y, Chen S. Numerical Simulation of CFRP Thin-Walled Tubes Subjected to Quasi-Static Axial Crushing[C]// WCX™ 17: SAE World Congress Experience. 2017.
- [11] Evans D. Consistency of Thermoplastic Bumper Beam Impact Performance[C]// International Congress & Exposition. 1998.
- [12] Mamalis AG, Manolakos DE, Demosthenous GA, Ioannidis MB. Static and dynamic axial crumbling of thin-walled fibreglass composite square tubes. Compos B Eng 1997;28:439 - 51.
- [13] Saito H, Takeuchi H, Kimpara I. A study of crack suppression mechanism of thin-ply carbon-fiber-reinforced polymer laminate with mesoscopic numerical simulation. J Compos Mater 2014;48(17):2085 - 96.
- [14] Siromani D, Henderson G, Mikita D, et al. An experimental study on the effect of failure trigger mechanisms on the energy absorption capability of CFRP tubes under axial compression[J]. Composites Part A, 2014, 64(21):25-35.
- [15] Luo H, Yan Y, Zhang T, et al. Progressive failure numerical simulation and experimental verification of carbon-fiber composite corrugated beams under dynamic impact[J]. Polymer Testing, 2017, 63.
- [16] Mcgregor C, Vaziri R, Poursartip A, et al. Axial Crushing of Triaxially Braided Composite Tubes at Quasi-static and Dynamic Rates[J]. Composite Structures, 2016, 157:197-206.