

混杂复合材料层合板抗冲击性能研究

张超锋¹ 韩超超¹ 朱佳佳²

(1 江南大学机械工程学院, 无锡 214122)

(2 江南航天机电工业有限公司, 苏州 215300)

文 摘 为了探究复合材料层合板在实际应用中因承受冲击载荷而造成的结构安全问题,本研究采用实验和仿真相结合的方法,首先探究冲头形状对复合材料层合板损伤机理的影响,然后结合不同冲击能进一步揭示层合板的承载力和能量吸收变化规律。结果表明,相同冲击能下,层合板的损伤范围和承载力随着圆锥头、半球头、平头依次增加;相应的层合板的临界穿透能量随着圆锥头、半球头、平头依次增大;冲头形状和冲击能对层合板的吸能能力有较大的影响。

关键词 混杂复合材料,层合板,低速重载冲击,冲头形状,冲击性能

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2023.06.007

Research on Impact Resistance of Hybrid Composite Laminates

ZHANG Chaofeng¹ HAN Chaochao¹ ZHU Jiajia²

(1 School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122)

(2 Suzhou Jiangnan Aerospace Mechanical and Electrical Industry Co. Ltd., Suzhou 215300)

Abstract In order to investigate the structural safety of composite laminates due to impact loads in practical applications, the influence of the impactor shape on the damage mechanism of composite laminate was analyzed simultaneously by experiment and simulation. Subsequently, the variation pattern of the load-bearing capacity and energy absorption of the laminate was further revealed considering different impact energy. The results show that under same impact energy, the damage range and bearing capacity of laminates present incremental change when impacted by conical, hemispherical and flat impactors. The critical penetration energy of laminates increases along using conical, hemispherical and flat impactors. The impactor shape and the impact energy have a greater influence on the energy absorption capacity of laminates.

Key words Hybrid composite material, Laminate, Low-velocity heavy mass impact, Impactor shape, Impact resistance

0 引言

复合材料层合板比强度高、比刚度高、可设计性强、抗疲劳性能好,广泛应用于航空航天、建筑、交通运输等领域^[1-2]。但是复合材料在承受冲击载荷后造成的损伤会降低其强度和刚度^[3-4]。因此,探究复合材料层合板在低速重载下的抗冲击性能在实际应用中具有重要意义^[5]。

大多数研究是通过损伤模式、峰值力和能量吸收来评估复合材料层合板的抗冲击性能^[6-7]。在常见的纤维材料中,碳纤维层合板和玻璃纤维层合板在冲击区域内会发生分层、基体开裂和纤维断裂等

损伤^[8-9]。研究表明随着层合板厚度的增加,其抗冲击性能得到了改善,整体结构不易发生穿透损伤^[10-11]。在实际应用中对层合板造成冲击损伤的物体具有多种形状,但是大多数学者是通过半球头冲击实验展开对层合板抗冲击性能的研究^[4,12]。同时,现研究主要集中在单种纤维层合板的抗冲击性能研究^[13-14],对多种纤维混杂编织而成的层合板的抗冲击性能尚未展开深入研究。为此,本文通过实验和仿真相结合的方法,研究冲头形状对混杂复合材料层合板的损伤模式和抗冲击性能的影响,可以为合理评估层合板低速重载冲击下的损坏程度和力学性

收稿日期:2021-11-30

基金项目:国家自然科学基金(51408263)

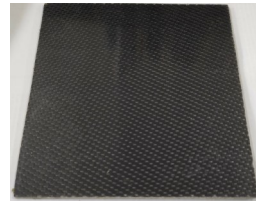
第一作者简介:张超锋,1979年出生,博士,教授,主要从事结构优化设计研究。E-mail:zcf830703@163.com

能提供参考。

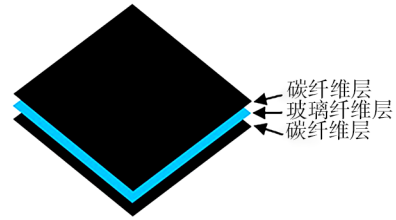
1 实验

1.1 试样

复合材料层合板是由碳纤维/玻璃纤维混杂斜纹



(a) 试样



(b) 示意图

图1 层合板试样和示意图

Fig. 1 Laminate specimen and schematic

1.2 试验方案

本研究采用实验和仿真相结合的方法研究层合板的抗冲击性能。首先用圆锥冲头对层合板进行低速重载冲击。通过不同冲击能展开层合板在圆锥头下的冲击损伤性能研究。同时,通过实验和仿真的对比来验证仿真的有效性。接着进一步探究层合板在半球头和平头下的冲击损伤性能。最后对比分析3种不同形状的冲头对层合板抗冲击性能的影响。

研究计划分为3组,如表1所示,圆锥头、半球头、平头分别用C、H、F来表示;冲头质量均设定为31 kg,通过调节冲头高度来调节冲击能量。试样编号的意义举例如下:IE25-16C表示冲头是直径为16 mm的圆锥头,冲击能是25 J。

表1 研究计划
Tab. 1 Research program

组	试样	冲头直径 /mm	冲头形状	冲击能量 /J	落锤高度 /mm	初始速度 /m·s ⁻¹	仿真
组1	IE15-16C	16	C	15	49	0.985	√
	IE20-16C			20	69	1.137	√
	IE25-16C			25	82	1.270	√ √
	IE35-16C			35	115	1.503	√ √
组2	IE15-16H	16	H	15	49	0.985	√
	IE20-16H			20	69	1.137	√
	IE25-16H			25	82	1.270	√ √
	IE35-16H			35	115	1.503	√ √
组3	IE15-16F	16	F	15	49	0.985	√
	IE20-16F			20	69	1.137	√
	IE25-16F			25	82	1.270	√ √
	IE35-16F			35	115	1.503	√
	IE45-16F			45	148	1.704	
	IE55-16F			55	181	1.884	
	IE65-16F	65	214	2.048	√ √		

编织而成的,如图1所示。层合板的铺层顺序为[(0/90)_c(±45)_{6c}(0/90)_c](C表示碳纤维,G表示玻璃纤维),名义厚度为1.92 mm,共有8层,每层厚度为0.24 mm。层合板试样为边长150 mm的正方形。

1.3 试验步骤

冲击试验机如图2所示。试验机主要是由落锤系统、夹具和数据采集系统组成。夹具由两个带有边长为125 mm正方形切口的钢板制作而成,层合板试样被完全固定在夹具的正中心。为准确评估单次冲击下层合板的抗冲击特性,通过连杆机构防止落锤的二次冲击。冲头的载荷和速度历程曲线通过数据采集系统获得。

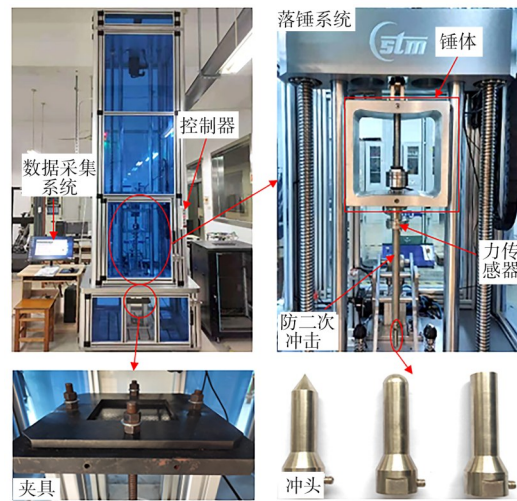


图2 冲击试验机

Fig. 2 Impact testing machine

1.4 有限元模拟

采用ABAQUS/Explicit求解器分析层合板的冲击过程。模型采用C3D8R实体单元类型,并且对层合板冲击区域加密来提高计算效率。层合板模型的网格总数量是788 480个。冲击仿真模型如图3所示。

在数值分析中采用Surface-to-surface接触。为了模拟实际工况,在模型中设置层合板四周和夹具完全固定。冲头只允许Z方向的移动,并在冲头参考点的Z方向上施加初速度预定义场。

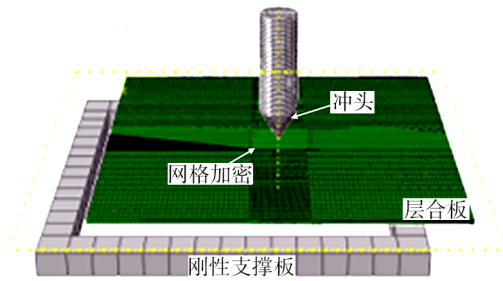


图3 有限元模型

Fig. 3 Schematic of the impact numerical model

模型中层合板的本构关系采用渐进失效模型。渐进失效理论被编进VUMAT子程序中,并应用于层合板模型。层合板的力学性能如表2所示。

层合板的失效准则如下:

纬向拉伸失效($\varepsilon_{11} \geq 0$)

$$\frac{\varepsilon_{11}^2}{(\varepsilon_{0,1}^t)^2} + \frac{\varepsilon_{12}^2}{\varepsilon_{0,12}^2} + \frac{\varepsilon_{13}^2}{\varepsilon_{0,13}^2} = 1$$

纬向压缩失效($\varepsilon_{11} < 0$)

$$\left(\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{0,1}^c}\right)^2 = 1$$

经向拉伸失效($\varepsilon_{22} \geq 0$)

$$\frac{\varepsilon_{22}^2}{(\varepsilon_{0,2}^t)^2} + \frac{\varepsilon_{12}^2}{\varepsilon_{0,12}^2} + \frac{\varepsilon_{23}^2}{\varepsilon_{0,23}^2} = 1$$

经向压缩失效($\varepsilon_{22} < 0$)

$$\left(\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{0,2}^c}\right)^2 = 1$$

层间拉伸失效($\varepsilon_{33} \geq 0$)

$$\frac{\varepsilon_{33}^2}{(\varepsilon_{0,3}^t)^2} + \frac{\varepsilon_{13}^2}{\varepsilon_{0,13}^2} + \frac{\varepsilon_{23}^2}{\varepsilon_{0,23}^2} = 1$$

层间压缩失效($\varepsilon_{33} < 0$)

表2 层合板材料参数

Tab. 2 Mechanical properties of the laminate

描述	T300/环氧树脂	玻璃纤维
密度	$\rho = 1570 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 1756 \text{ kg/m}^3$
弹性参数	$E_{11} = 63 \text{ GPa}$	$E_{11} = 14.73 \text{ GPa}$
	$E_{22} = 63 \text{ GPa}$	$E_{22} = 14.73 \text{ GPa}$
	$E_{33} = 8 \text{ GPa}$	$E_{33} = 6.87 \text{ GPa}$
	$\mu_{12} = 0.06$	$\mu_{12} = 0.12$
	$G_{12} = 4100 \text{ MPa}$	$G_{12} = 2800 \text{ MPa}$
	$G_{13} = 3800 \text{ MPa}$	$G_{13} = 1430 \text{ MPa}$
强度值	$G_{23} = 3800 \text{ MPa}$	$G_{23} = 1430 \text{ MPa}$
	$X_T = 499 \text{ MPa}$	$X_T = 442 \text{ MPa}$
	$X_C = 352 \text{ MPa}$	$X_C = 337 \text{ MPa}$
	$Y_T = 499 \text{ MPa}$	$Y_T = 442 \text{ MPa}$
	$Y_C = 352 \text{ MPa}$	$Y_C = 337 \text{ MPa}$
	$Z_T = 64 \text{ MPa}$	$Z_T = 75 \text{ MPa}$
	$Z_C = 160 \text{ MPa}$	$Z_C = 210 \text{ MPa}$
	$S_{12} = 88 \text{ MPa}$	$S_{12} = 52 \text{ MPa}$
	$S_{13} = 52 \text{ MPa}$	$S_{13} = 45 \text{ MPa}$
	$S_{23} = 52 \text{ MPa}$	$S_{23} = 45 \text{ MPa}$

$$\frac{\varepsilon_{33}^2}{(\varepsilon_{0,3}^c)^2} + \frac{\varepsilon_{13}^2}{\varepsilon_{0,13}^2} + \frac{\varepsilon_{23}^2}{\varepsilon_{0,23}^2} = 1$$

式中,下标1、2、3分别表示纬向、经向和面外方向。 ε_i 表示每个主方向的应变, ε_{ij} 表示*i-j*面的剪切应变。 $\varepsilon_{0,i}^t$ 表示极限拉伸应变, $\varepsilon_{0,i}^c$ 表示极限压缩应变, $\varepsilon_{0,ij}$ 表示*i-j*面的极限剪切应变。

2 结果和讨论

2.1 损伤模式

2.1.1 实验结果

不同形状的冲头冲击层合板的损伤实验结果如表3所示。层合板上表面的冲击区域有明显的穿孔。

表3 不同冲头冲击层合板的实验损伤模式

Tab. 3 Experimental failure modes of laminate under different impactors

表面	IE35-16C	IE35-16H	IE65-16F
前表面			
后表面			

下表面的穿孔损伤范围随着圆锥头、半球头和平头依次增大。层合板损伤模式主要有纤维断裂和分层。

冲头形状对层合板的损伤模式影响很大。当冲头为圆锥头时,锥尖刺破层合板,使得部分纤维发生断裂。层合板被锥尖刺破后会以挤压损伤形式向四周逐渐扩展,形成挤压穿孔损伤现象。当冲头为半球头时,半球头撕裂纤维层,使得损伤范围略大于圆

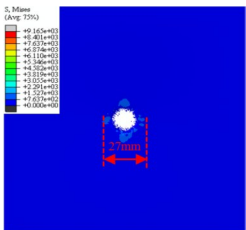
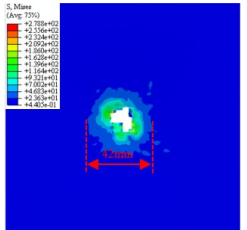
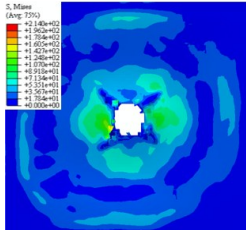
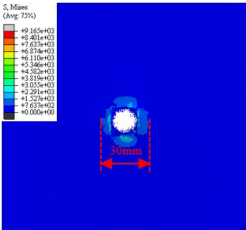
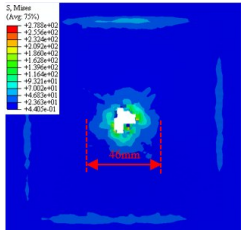
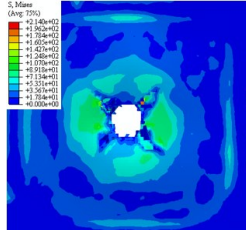
锥头冲击下的层合板损伤范围。而平头由于冲压效应导致层合板产生剪切穿孔损伤,同时冲击区域周围也呈现出明显的微小纤维断裂损伤。另外,由于层合板中碳纤维和玻璃纤维韧性的差异,3种冲头都导致层合板的冲击区域呈现纤维层分层损伤现象。

2.1.2 仿真结果

层合板的损伤仿真结果如表4所示,仿真与实验的损伤情况保持一致。

表4 不同冲头冲击层合板的仿真损伤模式

Tab. 4 Numerical failure modes of laminate under different impactors

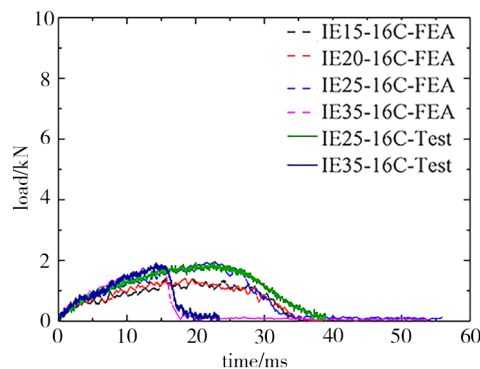
表面	IE35-16C	IE35-16H	IE65-16F
前表面			
后表面			

从仿真结果中可以更明显的看出,层合板损伤区域范围随着圆锥头、半球头、平头逐渐增大。圆锥头冲击下层合板的损伤主要集中在很小的区域内,损伤区域直径约为冲头直径的1.7倍。在半球头冲击下,损伤区域扩大至冲头直径的2.7倍。当冲头为平头时,损伤几乎扩展到整个表面。

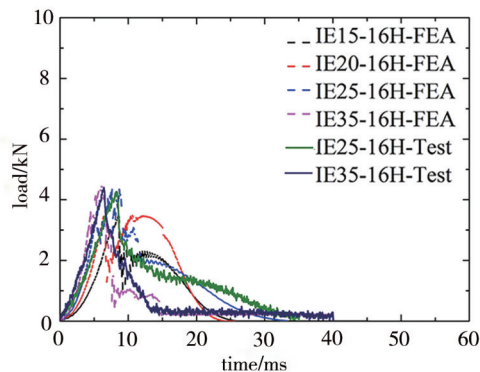
2.2 接触力曲线

不同冲头和层合板的接触力历程曲线如图4所示,实验和仿真结果具有良好的一致性。接触力曲线先是快速增加,达到峰值力后缓慢减小或者急剧下降。

在不同形状的冲头冲击下,曲线的一次刚度随着圆锥头、半球头、平头依次增大。这主要是试样接触力达到峰值的响应时间差异所导致。在相同的冲击能下,圆锥头达到峰值力所用时间要远大于半球头和平头达到峰值力所用的时间。这是因为圆锥头与层合板接触是由一个点逐渐扩大的过程,因此消耗时间长。而平头与层合板的接触是整个面接触,可在短时间内消耗能量。



(a) C



(b) H

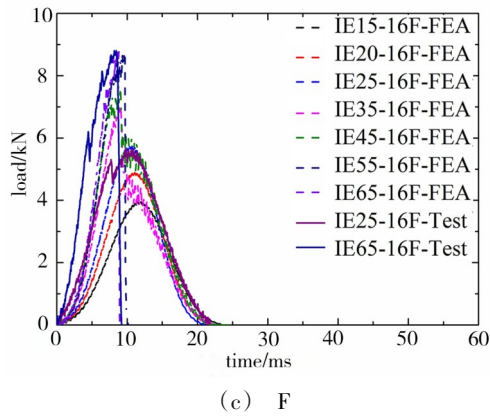


图4 不同冲头下冲击力历程曲线对比
Fig. 4 Comparison of load-time curves under different impactors

2.3 承载力

2.3.1 不同能量下的承载力

不同冲头冲击层合板的承载力随着冲击能的变化如图5所示。在同种冲头冲击下,层合板的承载力随着冲击能的增加而增加,直至层合板被完全穿透后承载力保持稳定值。层合板在超过其自身抗冲击能力后就会发生局部穿透失效。

冲头形状对层合板的承载力影响较大。在相同的冲击能下,层合板承载力随着圆锥头、半球头、平头依次增大。同时可以看出,不同冲头穿透层合板的冲击能各有不同。圆锥头、半球头和圆头分别在约22、25、55 J的冲击能下完全穿透层合板。

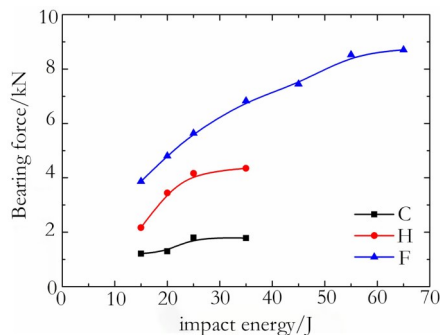


图5 不同冲击能下层合板的承载力曲线
Fig. 5 Bearing force of laminate under different impact energies

2.3.2 最大承载力

不同冲头冲击层合板产生的最大承载力如图6所示。不同形状冲头冲击层合板产生的最大承载力差异性较大。这主要是由于层合板的受力和承载面积相关。在圆锥头冲击下,层合板被锥尖刺破后损伤向四周逐渐扩展,冲击影响范围和承载面积较小。半球头冲击下,层合板被冲头冲击撕裂穿孔,承载面积相比于圆锥头冲击下的承载面积较大。而由于平头的冲压效应,层合板表现为整体大面积受力,其抗穿透能力最大。

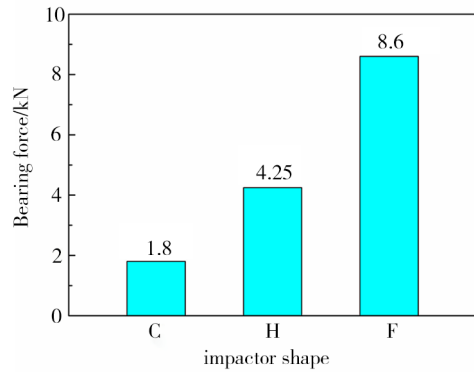


图6 不同冲头下层合板的最大承载力
Fig. 6 Maximum bearing force of laminate under different impactors

2.4 能量吸收特性

2.4.1 能量吸收曲线

不同冲击条件下,层合板的能量吸收曲线如图7所示。同种冲头冲击下,夹层板的能量吸收随着冲击能的增加而增加,直到层合板被完全穿透,能量吸收趋于稳定值。但是,在层合板被穿透之后,能量吸收也有略微增加。这主要是因为,能量越大冲击波及范围越大,层合板微小损伤增加。

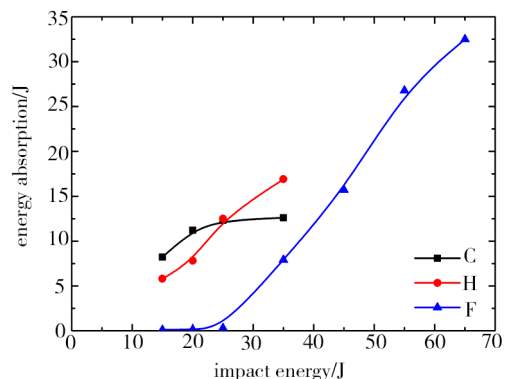


图7 不同冲击能下层合板的能量吸收曲线
Fig. 7 Energy absorption of laminate under different impact energies

从图7可以看出,在冲击能低于25 J时,层合板的能量吸收随着圆锥头、半球头、平头依次减小。而在冲击能大于50 J时,层合板的能量吸收随着圆锥头、半球头、平头依次增大。这表明在冲击能低于25 J时,相比于半球头和圆头冲击下层合板的吸能能力,圆锥头冲击层合板表现出更好的吸能能力。而在冲击能大于50 J时,平头冲击层合板会表现出更好的吸能能力。这主要是因为当冲击能较小时,在半球头和圆头冲击下,层合板处于微小损伤和弹性阶段。而在圆锥头冲击下,较小的冲击能也能对层合板造成局部穿透损伤。在冲击能较大时,由于损伤区域的依次增大,层合板损伤坏范围随着圆锥头、半球头和圆头依次增大,能量吸收也依次增大。

2.4.2 层合板的吸能能力

不同冲头冲击下层合板的吸能能力如图8所示。层合板的吸能能力随着圆锥头、半球头、平头依次增大。平头冲击下层合板的吸能能力是圆锥头冲击下层合板的吸能能力的2倍以上。这主要是因为穿透的情况下,由平头冲压效应造成的层合板损伤范围更大所导致的。

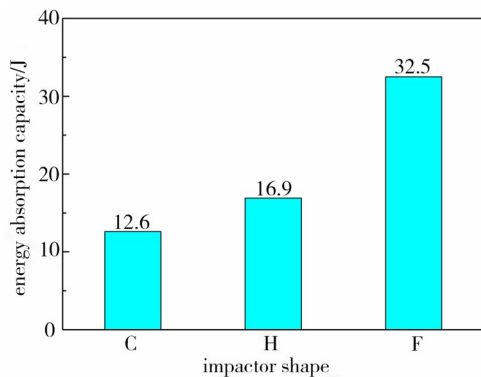


图8 不同冲头下层合板的吸能能力

Fig. 8 Energy absorption capacity of laminate under different impactors

3 结论

本文主要研究低速重载冲击下混杂复合材料层合板的抗冲击性能,通过多种冲击能展开层合板在不同冲头下的冲击损伤性能研究。可以得出以下结论:

(1) 在相同的冲击能下,层合板损伤范围和承载力随着圆锥头、半球头、平头依次增大;

(2) 层合板在圆锥头、半球头和平头冲击下的临界穿透能量分别约为22、25、55 J;

(3) 在冲击能低于25 J时,圆锥头冲击层合板表现出更好的吸能能力。而在冲击能大于50 J时,平头冲击层合板表现出更好的吸能能力。

参考文献

[1] 谭建设,张晓晶,张俊琪,等. 复合材料层合板低速冲击的接触力和能量响应仿真[J]. 复合材料学报, 2014, 31(04):970-980.

TAN Jianshe, ZHANG Xiaojing, ZHANG Junqi, et al. Simulation of impact force and energy response of composite laminate subjected to low velocity impact [J]. Acta Material Compositae Sinica, 2014, 31(04):970-980.

[2] ANG Qiu, KUNKUN Fu, WEI Lin, et al. Modelling low-speed drop-weight impact on composite laminates [J]. Materials and Design, 2014, 60: 520-531.

[3] SEVKAT E, LIAW B, DELALE F. Drop-weight impact response of hybrid composites impacted by impactor of various

geometries[J]. Materials and Design, 2013, 52: 67-77.

[4] ICTEN B M, KIRAL B G, DE Niz M E. Impactor diameter effect on low velocity impact response of woven glass epoxy composite plates [J]. Composites Part B, 2013 (50) : 325-332.

[5] 屈天骄,郑锡涛,范献银,等. 复合材料层合板低速冲击损伤影响因素分析[J]. 航空材料学报, 2011(06):81-86.

QU Tianjiao, ZHENG Xitao, FAN Xianyin, et al. Exploration of several influence factors of low-velocity impact damage on composite laminates [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011(06):81-86.

[6] BALAGANESAN G, KHAN VC. Energy absorption of repaired composite laminates subjected to impact loading [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 98:39-48.

[7] BIENIAS J, JAKUBCZAK P, DADEJ K. Low-velocity impact resistance of aluminium glass laminates—experimental and numerical investigation [J]. Composite Structures, 2016, 152: 339-348.

[8] BULUT M, ERKLIĞ A. An experimental investigation on damage characteristics of laminated hybrid composites subjected to low velocity impact [J]. Polymer Composites, 2017 (39) : 3129-3139.

[9] 张志远,李伟,蒋鹏,等. 碳纤维复合材料层合板低速冲击损伤特性研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(04): 34-39.

ZHANG Zhiyuan, LI Wei, JIANG Peng, et al. Damage characteristics of carbon fiber composite laminates under low-velocity impact [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2021, 44(04):34-39.

[10] MAHESH V, JOLADARASHI S, KULKARNI S M. Influence of laminate thickness and impactor shape on low velocity impact response of jute-epoxy composite: FE study [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 28: 545-550.

[11] REDDY T S, MOGULANNA K, REDDY K G, et al. Effect of thickness on behaviour of E-glass/epoxy composite laminates under low velocity impact [J]. Procedia Structural Integrity, 2019, 14: 265-272.

[12] TIE Y, HOU Y, LI C, et al. An insight into the low-velocity impact behavior of patch-repaired CFRP laminates using numerical and experimental approaches [J]. Composite Structures, 2018(190): 179-188.

[13] JIANWU Zhou, BINBIN Liao, YAOLIAO Shi, et al. Low-velocity impact behavior and residual tensile strength of CFRP laminates [J]. Composites Part B, 2019, 161: 300-313.

[14] PANBARASU K., RANGANATH V. R., PRAKASH Raghu V. An experimental study on impact behavior of quasi-isotropic CFRP laminates [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 44: 289-293.