DOI: 10.11883/1001-1455(2016)02-0170-07

编织 Kevlar/Epoxy 复合材料层合板在冲击荷载下的动态响应*

马小敏[1],李世强[1],李 鑫[2],王志华[2],吴桂英[1]
(1. 太原理工大学力学学院,山西 太原 030024;
2. 太原理工大学应用力学与生物医学工程研究所,山西 太原 030024)

摘要: 通过编织 Kevlar/Epoxy 复合材料层合板的平头弹冲击实验,分析了结构在不同冲量下的变形失效模式以及结构的抗冲击性能。实验表明复合板的变形失效模式主要表现为:(1)弹性变形;(2)复合板表面嵌入失效及整体塑性大变形;(3)背面纤维拉伸断裂及分层失效。基于实验研究,运用 LS-DYNA 971 有限元程序对铺层数不同的复合板在冲击载荷作用下的动态响应过程进行了数值模拟,模拟结果与实验吻合较好,子弹作用区域边缘处首先发生近似圆形的嵌入失效,而在板背面发生近似正方形的破坏区域;计算中重点分析了铺层数对结构动力响应的影响,在一定冲量范围内,通过对铺层数的优化,能够有效地减小后面板挠度,提高结构的能量吸收效率,增强结构的抗冲击性能。

关键词: 固体力学;动态响应;冲击荷载;Kevlar/Epoxy 复合材料层合板
中图分类号: O347.3 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

纺织结构复合材料是以纺织纤维体作为增强材料,用树脂固化后形成的纤维增强复合材料。二维纺织结构主要包括平纹、斜纹和缎纹织物,具有比强度高、比刚度大和材料性能可以设计等优点,在防护工程领域具有良好的应用前景[1]。P. M. Cunniff[2-3]研究了子弹侵彻叠层平纹织物时的入射速度和剩余速度的关系,得到了在不同形状子弹侵彻下结构的弹道极限以及半经验公式;顾冰芳等[4]研究了不同形状子弹冲击下 Kevlar 纤维叠层织物的防弹机理和性能,观测了纤维的表观破坏形态和微观损伤机理;R. Barauskas 等[5]基于 LS-DYNA 软件通过考虑纱线滑动、子弹和纱线之间的滑动计算了二维编织物在可变形体侵彻下的破坏过程。这些研究主要关注纤维材料的弹道冲击侵彻性能,而对于复合材料整体动力响应方面的研究还较少。V. Kostopoulos 等[6]使用有限元技术分析了 3 种不同的复合材料(碳、玻璃和 Kevlar)制作的摩托车安全头盔的冲击动态响应过程,发现 Kevlar 配置的安全头盔防护性能要优于其他 2 种,指出 Kevlar 较低的抗剪性增强了头盔的能量吸收和压缩能力。I. Taraghi 等[7]研究了常温(27 ℃)和低温(−40 ℃)下,多壁碳纳米管增强的平纹 Kevlar/环氧树脂复合板的低速冲击响应,在基体内加入一定量的多壁碳纳米管能显著提高复合板的吸能和刚度。P. N. B. Reis 等[8]研究了 Kevlar/纳米粘土增强环氧树脂复合板的冲击响应,通过在基质内加入一定量的纳米粘土可以提高复合板的弹性恢复性能和侵彻阀值。本文中研究了钢制平头弹撞击下平纹 Kevlar 纤维复合板的动态响应,给出了复合板的变形失效模式。在实验的基础上,利用 LS-DYNA 分析钢质平头弹冲击载荷作用下平纹 Kevlar 纤维复合板的动力响应和纤维铺层数对结构动力响应的影响,模拟结果与实验吻合较好。

1 实 验

1.1 实验过程

实验试件为编织 Kevlar/Epoxy 复合材料层合板,尺寸为 300 mm×300 mm。试件铺层厚度

* **收稿日期**: 2014-08-13; **修回日期**: 2014-11-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(11402163);山西省自然科学基金项目(2014011009-1)
第一作者: 马小敏(1988—),男,博士研究生; **通讯作者**: 吴桂英,wgy2005112@163.com。

0.27 mm，共 18 层，经浸渍环氧树脂后加温加压形成。每层织物组织都为平纹组织，由 2 根经纱和 2 根纬纱组成织物循环，经纱和纬纱每隔 1 根纱线交织 1 次。实验采用平头钢制子弹，长度 150 mm，直径为 37 mm，质量为 1.24 kg。冲击实验装置由空气动力枪、激光位移传感器(micro-epsilon LD1625-200，响应特性：采样率 37 kHz，每秒采集 185 000 个点，能够实时探测到靶板中点的位移)、激光测速仪、实验夹具、超动态应变仪和高速摄像机等组成，如图 1 所示。实验加载是通过空气动力枪驱动钢制子弹撞击复合板实现，子弹速度由空气动力枪气压控制，其大小由激光测速装置获得。实验支架采用钢制正方形夹具，端面平整，其外部边长 400 mm，内部边长 250 mm，通过螺栓固定在不可移动的平台上。实验中通过高速摄像仪对整个加载过程进行了拍摄。

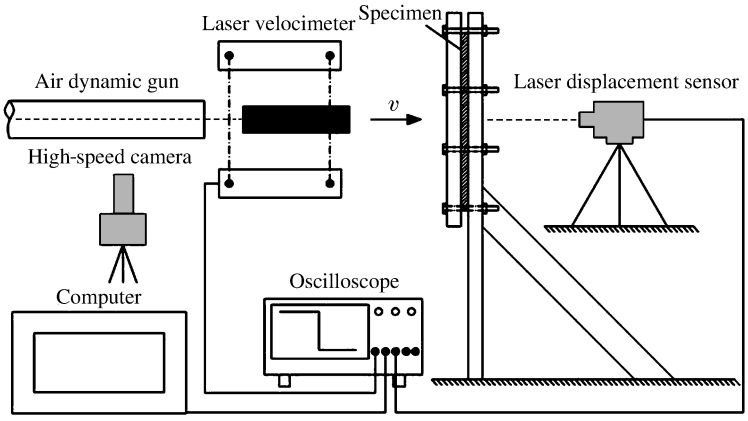


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental devices

1.2 实验结果

分别对试件的变形失效模式和背面中心点的挠度进行分析，实验结果如表 1 所示，n 为层数，h 为纤维复合板的厚度，v 为冲击速度，I 为冲击冲量，W 为残余挠度。结构在冲击载荷下主要呈现 3 种变形失效模式：Ⅰ型为未发生明显破坏失效，整体呈现弹性变形，如图 2(a)所示；Ⅱ型为复合板表面子弹作用区域的嵌入失效，结构呈整体塑性大变形，如图 2(b)所示；Ⅲ型为背面纤维拉伸断裂及分层失效，如图 2(c)所示。

表 1 实验数据

Table 1 Experimental data

No.	n	h/mm	v/(m·s^{-1})	I/(N·s)	W/mm	变形失效模式
1	18	5.11	13.30	16.49	1.8	Ⅰ
2	18	4.98	24.70	30.63	8.3	Ⅱ
3	18	5.15	32.60	40.42	12.4	Ⅱ Ⅲ
4	18	5.13	36.47	45.22	13.5	Ⅱ Ⅲ
5	18	5.10	36.50	45.26	13.3	Ⅱ Ⅲ

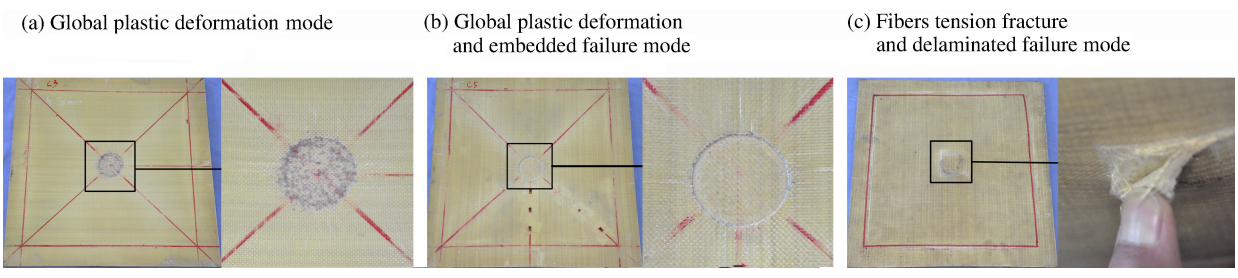


图 2 复合板的变形失效模式

Fig. 2 The deformation and failure modes of the plates

平头弹撞击瞬间,复合板受载边界处将产生较大的剪切应力,导致表面纤维及胶层瞬时剪切失效,因此正面受冲击区域边缘发生了明显的嵌入失效;纤维良好的延展性使得复合板整体为塑性大变形,呈现穹形;纤维的正交分布导致背面纤维拉伸断裂后裂纹沿着垂直于断裂纤维方向扩展,并且出现了分层现象,因此背面发生近似方形的局部破坏(不考虑夹具的影响)。

从表 1 中看出,在不同冲击速度下,复合板背面中心点的残余挠度随着冲击速度的增加逐渐增大。图 3 给出了不同冲击速度下复合板背面中心点的挠度时程曲线,可以看出:在子弹冲击作用下,板背面中心点在 0.8 ms 左右达到最大挠度,随后发生反弹,在平衡位置附近进行振荡,最终静止;且当冲击速度 $v=13.30$ m/s 时,试件的后面板的瞬时挠度峰值是最终挠度的 5.7 倍,即后面板瞬时挠度有可能对被保护的人员或结构产生更大的伤害,因此在用作防护结构时不能仅考虑最终挠度。

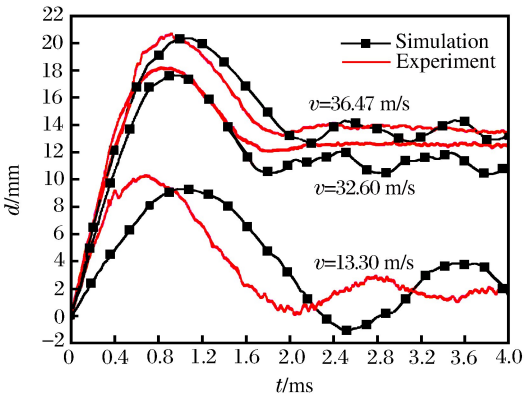


图 3 复合板背面中心点位移时程曲线

Fig. 3 Displacement histories of the mid-span in the back face

2 数值模拟

2.1 有限元模型

2.1.1 材料参数

纤维层采用复合材料平纹织物层合板模型(MAT_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC)具体材料参数见表 2,其中 ρ 为密度,E 为弹性模量,G_{ab} 为面内剪切模量,G_{ca} 为层间剪切模量,ν 为泊松比,X_t 为纵向拉伸强度,X_c 为纵向压缩强度,Y_t 为横向拉伸强度,Y_c 为横向压缩强度,S_c 为面内剪切强度。环氧树脂层采用双线性应变强化弹塑性模型,密度为 1 200 kg/m^3,弹性模量为 12.0 GPa,泊松比为 0.34。假定冲击过程中子弹和夹具没有变形,采用刚体模型,密度为 7 800 kg/m^3。

表 2 Kevlar 纤维平纹织物的材料参数

Table 2 Material properties of the Kevlar composite fabric

ρ/(kg·m^{-3})	E/GPa	G_{ab}/GPa	G_{ca}/GPa	ν	X_t/GPa	X_c/GPa	Y_t/GPa	Y_c/GPa	S_c/GPa
1 400	59.5	5.18	5.18	0.34	1.20	0.23	1.20	0.23	0.12

2.1.2 几何模型

图 4 给出了 Kevlar/Epoxy 复合材料层合板在冲击载荷作用下的数值分析模型及冲击实验照片。为了实现与实验尽量一致的边界,数值模拟中同样采用了实验中的夹具形式:夹具与复合板之间定义自动面对面接触;子弹与纤维层、胶层之间定义侵蚀接触;纤维层与胶层之间共节点连接;在螺栓位置,采用弹簧单元来模拟夹具中螺栓的紧固作用。复合板为 300 mm×300 mm 的正方形,有效面积为250 mm×250 mm。基于 LS-DYNA 软件,建立了 1/4 计算模型。纤维层采用 shell193 壳单元,单元尺寸为 1.875 mm×1.875 mm,每层厚度为0.27 mm。上下表面及纤维层之间建立环氧树脂层,环氧树脂层采用 solid164 实体单元,单元尺寸为 1.875 mm×1.875 mm×0.27 mm。

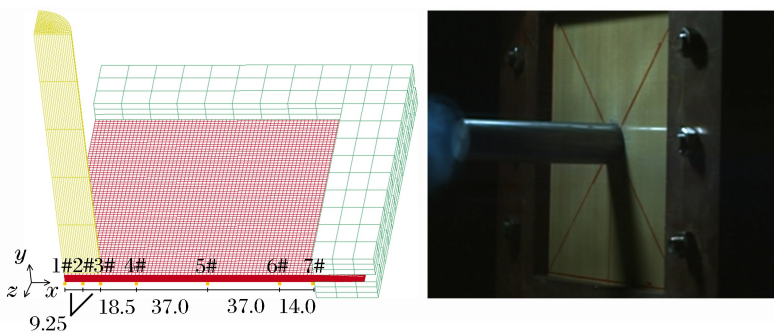


图 4 Kevlar 纤维复合板有限元模型及冲击实验照片

Fig. 4 Finite element model of the structure and its photo in the experiment

子弹同样采用 solid164 实体单元。整个模型中，纤维分为 18 层，共 115 200 个单元，胶层分为 19 层，共 121 600 个单元，经过网格敏感性验证，所选网格比较稳定，可以满足计算需要。

2.2　数值模拟验证

图 5 给出了冲击速度 $v=36.47$ m/s 时，Kevlar 纤维复合板受撞击变形的实验与数值模拟对比。复合板整体为塑性大变形，呈现穹形，中心受子弹冲击区域挠度最大，向边界处逐渐减小。正面子弹冲击区域边缘发生了明显的嵌入失效；背面纤维断裂呈现近似方形的破坏。表 3 给出了复合板受冲击最大位移、冲击后残余挠度的模拟结果与实验结果的对比。可以看出 Kevlar/Epoxy 复合材料层合板的变形失效模式、残余挠度的数值模拟结果和实验结果吻合较好，误差均在 20％以内。由此可见，本文中建立的有限元模型是可靠的，可以用于进一步的 Kevlar 纤维复合板抗冲击性能的分析。

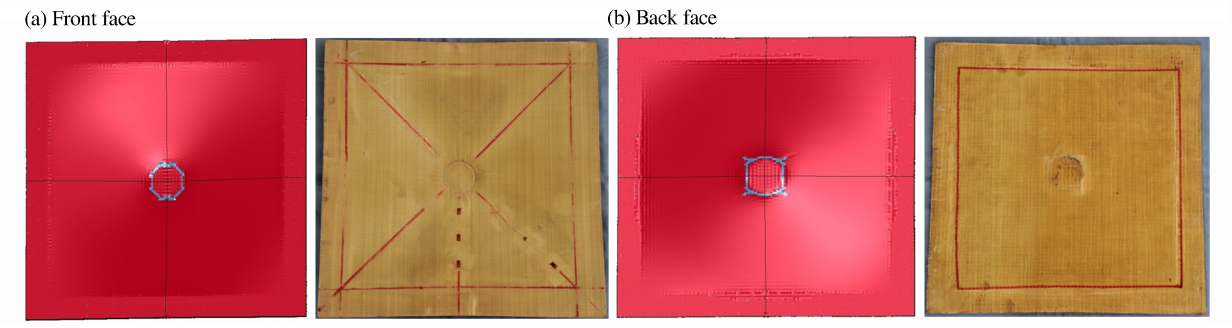


图 5　Kevlar 纤维复合板受撞击实验与数值模拟对比

Fig. 5　Comparison of the experimental and simulated final deformation modes under impact

表 3　Kevlar 纤维复合板在不同速度冲击下实验与数值模拟对比

Table 3　Comparison of the experimental and simulated results at different impact velocities

v/(m·s^{-1})	d_{max}/mm			W/mm		
	实验	数值模拟	ε/％	实验	数值模拟	ε/％
13.30	10.3	9.3	−9.71	1.8	1.5	−16.67
24.70	14.2	14.8	4.23	8.7	7.9	−9.20
32.60	18.3	17.6	−3.83	12.4	11.2	−9.68
36.47	20.7	20.3	−1.93	13.5	13.6	0.71
36.50	19.9	20.3	2.01	13.3	13.6	2.21

3　结果分析

3.1　动态响应过程

图 6 给出了冲击速度 $v=36.47$ m/s 下子弹和复合板的相互作用过程，整个过程可以分为 2 个阶段。(1)加载阶段($0\leqslant t\leqslant 1.1$ ms)：子弹发射后高速冲击复合板，板面受冲击后与子弹具有相同的速度一起运动，变形区域从中心向边界处传播，出现穹形大变形；$t=0.8$ ms 后随着变形进一步增加，冲击区域环氧树脂发生失效破坏结构中点挠度进一步增加；$t=1.1$ ms 后背面纤维拉伸断裂，结构中点挠度达到最大值。(2)卸载阶段($t>1.1$ ms)：结构贮存的弹性应变能转化为板和子弹的动能从而发生反向回弹，结构与子弹以相同的速度开始反弹，$t=2.0$ ms 结构与子弹分离，$t=2.2$ ms 结构反弹至反向最大挠度后进入自由振动阶段，并最终静止。如图 4(a)所示，在复合板背面纤维单元上分别取 7 个测点，其中 1＃点位于板中心，3＃点位于距离中心点 18.5 mm 处(即子弹边缘与板面的交界处)，7＃点位于边界处。图 7(a)给出了 1＃、3＃、5＃和 7＃点的 x 方向的应力时程曲线，可以看出 7＃点(边界处)应力正负交替出现，说明复合板在边界处沿 x 方向发生了弯曲变形；加载区域内纤维的应力要高于加载区域外，且加载区域边界处的应力最大，因而更容易发生纤维的拉伸断裂。图 7(b)给出了 3＃点截面处沿厚度方向第 1、7、11 和 18 层纤维单元 x 方向的应力分布，可以看出复合板所受应力由压应力逐渐转变为拉应力。因此，复合板首先在 3＃点截面第 18 层纤维单元处发生拉伸破坏。

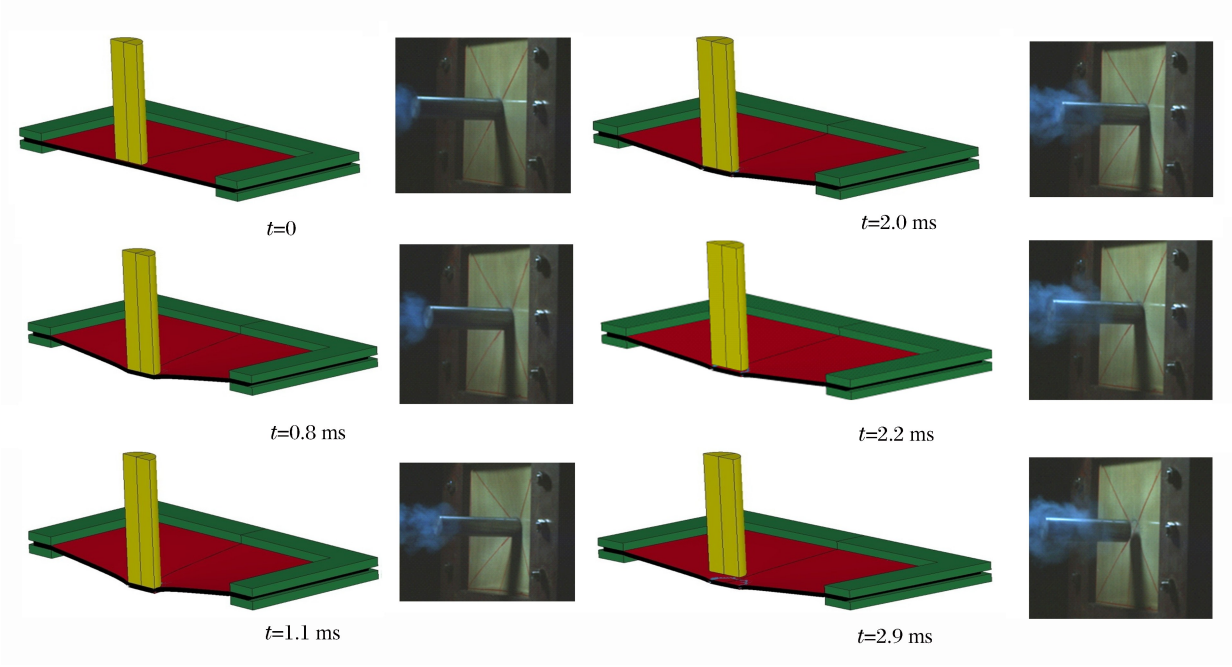


图 6 子弹和 Kevlar 纤维复合板作用的过程

Fig. 6 Process of projectile impacting the Kevlar laminates

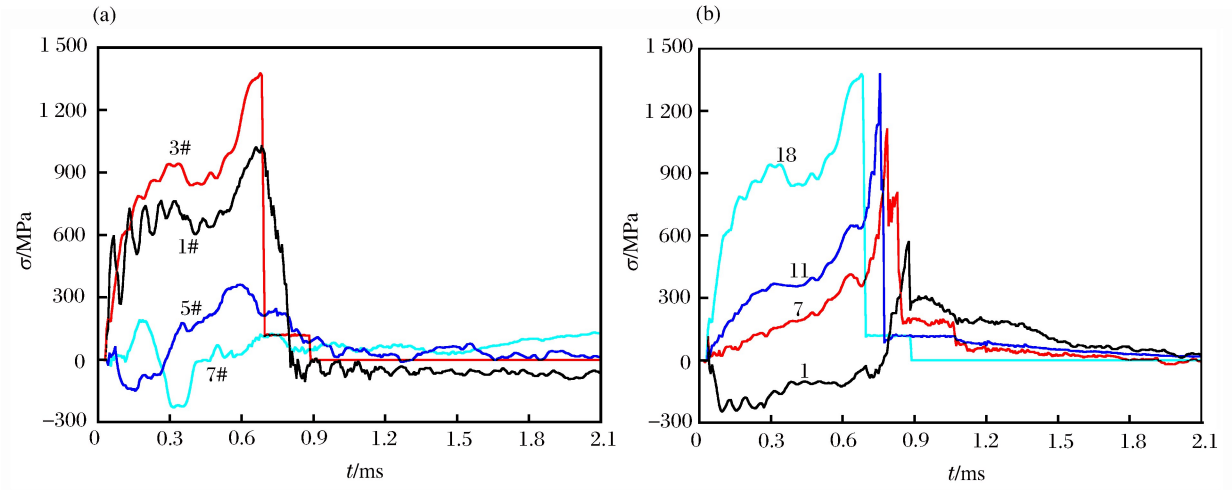


图 7 纤维复合板中应力分布时程曲线

Fig. 7 Histories of stress distribution in the Kevlar laminates

3.2 参数分析

为了研究加载冲量及铺层数对结构响应的影响，分别计算了不同加载冲量下(12.4～47.12 N·s)，不同铺层数(6、9、12、15 和 18 层)的复合板的动态响应：分别从复合板的能量吸收规律和背面中心点的残余挠度进行了研究。研究表明复合材料层合板的抗冲击性能与其铺层数和外加载荷有密切的关系。分别将纤维复合板的残余挠度 W、初始冲量 I 以及能量吸收 E_a 按下面的方法量纲一化：

$$\overline{W}=\frac{W}{h},\qquad \overline{I}=\frac{I}{m'\sqrt{\dfrac{\sigma_y}{\rho}}},\qquad m'=\frac{m}{s},\qquad \overline{E}=\frac{E_a}{E_i}$$

式中：ρ 纤维的密度，m 为纤维复合板的质量，s 为纤维复合板的有效作用面积，σ_y 为屈服应力，E_i 为子弹的冲击能量。

Kevlar 纤维复合材料层合板用于工程防护结构时，一般将其背面的残余变形作为抗冲击性能的主

要参数。图 8 给出了铺层数不同的复合板背面中心点量纲一残余挠度随量纲一冲量变化的规律，可以看出：铺层数相同的复合板背面中心点的残余挠度随着冲量的增大逐渐增大；当 $\bar{I}=0.8$ 时，12 层的复合板挠度最小，表现出最好的抗冲击性能；$\bar{I}\leqslant 0.75$ 时，15 和 18 层的复合板挠度差异很小；当 $\bar{I}>0.8$ 时，18 层的复合板挠度最小。因此在本文中研究的冲量范围内，随着冲量的变化，并不是纤维层数越多，复合板的挠度越小。

冲击能量 E_i 代表了结构可以转化的最大能量即子弹的动能，反之吸收能量 E_a 为结构实际转化的能量。从图 9 可以看出，纤维复合板的吸能效率 $\bar{E}$ 随着加载冲量和复合板铺层数的增加逐渐增大。冲量相同的情况下，吸能效率的提高随铺层数的增加呈现递减趋势；当 $\bar{I}>0.6$ 时，15 和 18 层铺层的复合板的吸能效率差异很小。虚线对应的点的横坐标为各结构发生侵彻破坏的阀值。

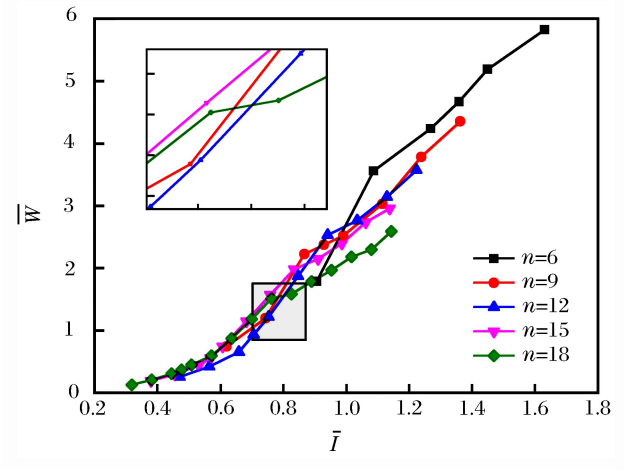


图 8 纤维复合板背面中心点量纲一残余挠度随量纲一冲量变化的规律

Fig. 8 Relation between normalized residual deflection and normalized impulse at the mid-span on the back face

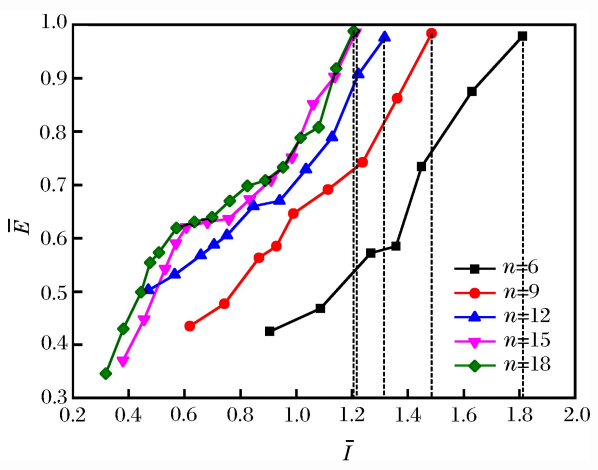


图 9 纤维复合板吸能效率随量纲一冲量变化的规律

Fig. 9 Relation between energy absorption efficiency and normalized impulse

4 结　论

针对 Kevlar/Epoxy 复合材料层合板在钢制平头弹冲击下的动态响应开展了实验研究和数值模拟，分析了结构在不同冲量下的变形失效模式以及抗冲击性能，主要结论如下：

(1)编织 Kevlar 纤维层合板的冲击失效模式与结构配置和载荷强度有关，主要表现为弹性变形、复合板表面嵌入失效及整体塑性大变形和背面纤维拉伸断裂及分层失效。

(2)数值模拟表明，子弹撞击区域边界处纤维应力沿厚度方向由压应力逐渐变为拉应力，且最大拉伸应力出现在背面几层。

(3)在一定的冲量范围内，数值模拟结果表明复合板的动力响应与铺层数和加载冲量密切相关；通过对复合板铺层数的优化，能够有效地减小后面板挠度，提高结构的能量吸收效率，增强结构的抗冲击性能。

参考文献：

[1] 王震鸣. 复合材料力学和复合材料结构力学[M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，1991.

[2] Cunniff P M. An analysis of the system effects in woven fabrics under ballistic impact[J]. Textile Research Journal, 1992,62(9):495-509.

[3] Cunniff P M. A semi-empirical model for the ballistic performance of textile-based personnel armor[J]. Textile Research Journal, 1996,66(1):45-58.

[4] 顾冰芳，龚裂航，徐国跃. Kevlar 纤维叠层织物防弹机理和性能研究[J]. 南京理工大学学报：自然科学版，2007,31

(5):638-642.
Gu Bingfang, Gong Liehang, Xu Guoyue. Bullet proof mechanism and performance of Kevlar multi-layers textile [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2007,31(5):638-642.
[5] Barauskas R, Abraitiene A. Computational analysis of impact of a bullet against the multilayer fabrics in LY-DYNA[J]. International Journal of Impact Engineer, 2007,34(7):1286-1305.
[6] Kostopoulos V, Markopouls Y P, Giannopoulos G, et al. Finite element analysis of impact damage response of composite motorcycle safety helmets[J]. Composites Part B: Engineering, 2002,33(2):99-107.
[7] Taraghi I, Fereidoon A, Taheri-Behrooz F. Low-velocity impact response of woven Kevlar/Epoxy laminated composites reinforced with multi-walled carbon nanotubes at ambient and low temperature[J]. Materials and Design, 2014,53(01):152-158.
[8] Reis P N B, Ferreira J A M, Zhang Z Y, et al. Impact response of Kevlar composites with nanoclay enhanced epoxy matrix[J]. Composites Part B: Engineering, 2013,46(3):7-14.

Dynamic response of woven Kevlar/Epoxy composite laminates under impact loading

Ma Xiaomin[1], Li Shiqiang[1], Li Xin[2], Wang Zhihua[2], Wu Guiying[1]
(1. *Mechanics College, Taiyuan University of Technology, Taiyuan* 030024, *Shanxi, China*;
2. *Institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan* 030024, *Shanxi, China*)

Abstract: Based on the blunt projectile impact test of woven Kevlar/Epoxy composite laminates, the deformation and failure modes of the composite laminates subjected to impact load were analyzed. Experimental results show that the deformation and failure behaviors were exhibited in the following ways: the global elastic deformation, the global plastic deformation with local embedded failure on the front surface, and the delaminated failure with fibers tension fracture on the back surface. The finite element software LS-DYNA 971 was employed to analyze the dynamic response of the woven Kevlar/Epoxy composite laminates subject to impact loading. Numerical simulation results show that there is a good agreement of the deformation/failure modes and the back face center-point deflection of the specimens, with those of the experimental results. The failure area on the front face is a circle embedded region, but a square failure region on the back face. The numerical simulation is focused on studying the effects of the number of layers on the dynamic response of the structure. Optimizing the number of the layers can effectively reduce the permanent deflection, increase the energy absorption efficiency and improve the impact resistance performance of the structure within a given range of impulses.

Key words: solid mechanics; dynamic response; impact load; Kevlar/Epoxy composite laminates

(责任编辑 王易难)