

平头弹冲击下复合材料层合板抗侵彻特性研究

郭安肖, 高经武, 蔡宣明, 于弘兴, 马沛冉

(中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为探明碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)在高速冲击加载下的力学响应和损伤失效机制, 对碳纤维复合材料层合板抗侵彻特性及响应机制展开了研究。基于Hashin损伤准则, 采用Cohesive界面单元, 建立了考虑分层损伤的碳纤维复合材料层合板在平头子弹侵彻下的数值模拟模型, 通过数值模拟计算研究了复合材料层合板在高速冲击侵彻下的吸能特性以及损伤失效模式。根据经典弹道极限理论分析, 确定了CFRP层合板的弹道极限, 研究了在高速冲击载荷加载下CFRP层合板的损伤演化过程, 分析了层合板的损伤机理。结果表明: CFRP层合板吸能特性呈双线性关系, 随着冲击能量的增加, 层合板能量吸收呈现先快速升高后逐渐平缓的特征; 在高速侵彻的冲击作用下, CFRP层合板最先发生着弹点处纤维拉伸断裂, 此后损伤破坏区域沿应力薄弱路径扩散, 导致基体压溃和层合板背部的鼓包, 随后演变为分层损伤, 最后发生纤维束劈裂等破坏模式; 在高速冲击载荷下层合板下方铺层区域破坏程度逐渐增大, 纤维层铺设角度的差异性致使层合板的层间受力状况随之改变, 从而使得各层之间形成了多样的破坏区域。

关键词: 碳纤维复合材料层合板; 抗侵彻; 弹道极限; 能量吸收; 冲击载荷

中图分类号: TB332

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2024.04.0005

引用格式: 郭安肖, 高经武, 蔡宣明, 等. 平头弹冲击下复合材料层合板抗侵彻特性研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(1): 27-34.

GUO Anxiao, GAO Jingwu, CAI Xuanming, et al. Research on the anti-penetration characteristics of composite laminates under impact of flat-nosed projectile[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2025, 46(1): 27-34.

Research on the Anti-Penetration Characteristics of Composite Laminates Under Impact of Flat-Nosed Projectile

GUO Anxiao, GAO Jingwu, CAI Xuanming, YU Hongxing, MA Peiran

(School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical response and damage failure mechanism of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) under high-speed impact loading, the penetration resistance characteristics and response mechanism of carbon fiber composite laminates was studied. Based on the Hashin damage criterion, and using Cohesive interface elements, a numerical simulation model of carbon fiber composite laminates considering delamination damage under flat-nosed projectile penetration was established. The numerical simulation was used to study the energy absorption characteristics and damage failure modes of composite laminates under high-speed impact penetration. According to the classical ballistic limit theory, the ballistic limit of the CFRP laminates was determined, and the damage evolution process of the CFRP laminates under high-speed impact loading was studied, meanwhile the damage mechanism of the laminate was analyzed. The

收稿日期: 2024-04-07

基金项目: 省部共建动态测试技术国家重点实验室基金资助项目(2022-SYSJJ-03)

作者简介: 郭安肖(1995—), 男, 硕士生, 主要从事碳纤维复合材料损伤失效模式的研究。

通信作者: 高经武(1969—), 男, 副教授, 博士, 主要从事碳纤维复合材料损伤失效模式研究。E-mail: gaojingwu@nuc.edu.cn。

results show that the energy absorption characteristics of the CFRP laminate exhibit a bilinear relationship. With the increase of impact energy, the energy absorption of the laminate first rapidly increases and then gradually levels off. Under the impact of high-speed penetration, the CFRP laminates first experiences fiber tension fracture at the impact point, followed by the spreading of damage rupture areas along stress weak paths, leading to matrix compression and the formation of bulges on the back of the laminate, subsequently evolving into delamination damage, and finally resulting in fracture modes such as fiber bundle splitting. The degree of damage in the lower layer region of the laminate gradually increases under high-speed impact loading. The differential laying angles of the fiber layers causes the change in the interlayer stress conditions of the laminate, and leads to various damage areas among the layers.

Key words: carbon fiber composite laminate; penetration resistance; ballistic limit; energy absorption; impact loading

0 引言

碳纤维复合材料(CFRP)因其优异的机械性能和耐腐蚀、高疲劳强度特性,在国防和民用领域得到广泛应用。了解CFRP层合板冲击失效和抗侵彻特性对提升复合材料防护性能至关重要^[1-5]。

邓云飞等^[6]研究了层合板球形弹高速斜冲击损伤特性和失效机制。拓宏亮等^[7]构建了基于连续介质损伤力学的复合材料三维模型,并预测了层合板的冲击损伤响应。Kazemi等^[8]测试了基于生物启发设计的层压板的冲击性能,发现了复合材料在高速冲击下的优异弹道和能量耗散能力。Zou等^[9]研究了复合材料层合板不同速度冲击下的损伤机制。Zhou等^[10]利用ABAQUS分析了考虑厚度效应的复合材料层合板的冲击动态响应和损伤机理。

本文采用Hashin损伤准则对复合材料内部的损伤模式进行定量识别,同时结合Cohesive界面单元研究裂纹扩展及分层行为,建立数值模型模拟高速冲击条件下平头子弹对CFRP层合板的侵彻效应。同时,应用经典弹道极限理论来评估撞击能量对CFRP层合板能量吸收特性的影响。通过分析层合板在冲击过程中的损伤演化,探讨材料在受到动态冲击载荷时的力学响应,阐明复合材料在高速冲击作用下的损伤失效机理。

1 有限元建模

本研究利用Hypermesh构建了CFRP层合板和平头子弹的数值模型,网格划分后运用LS-DYNA进行了数值模拟。子弹模型为圆柱形子弹,直径6 mm,高30 mm,所用材质为40Cr,子弹质量为6.7 g,如图1所示。

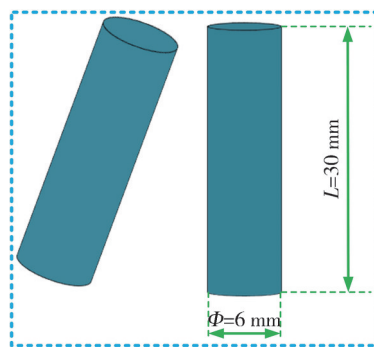


图1 圆柱形平头子弹

Fig. 1 Cylindrical flat-nosed projectile

层合板面板的尺寸(长×宽×厚)为100 mm×100 mm×1 mm和100 mm×100 mm×2 mm,两种层合板分别采用 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ 与 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{s2}$ 的准各向同性铺层,在模型中直接编码铺层的顺序和角度,以确保模拟结果反映实际层合板的各层特性,铺层方式如图2所示,建模单位为kg-mm-ms。

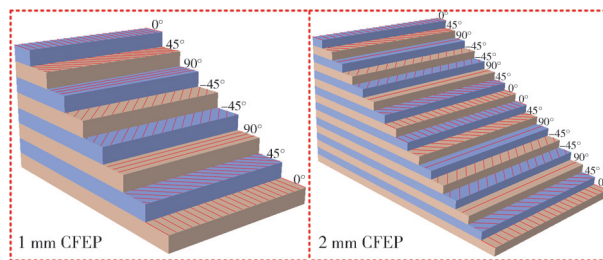


图2 两种不同厚度CFRP层合板的铺层方式

Fig. 2 Laying type of CFRP laminates at two kind of thickness

网格划分兼顾质量和尺寸的平衡,为保证计算效率和结果的准确性,模型选用六面体单元^[11-12],同时采用并行计算技术及高效调度计算资源以提高计算效率。侵彻发生在子弹与层合板接触面附近的区域,为减小应力集中的影响,对接触区域采用较密的网格划分,区域外采用稀疏

网格,两区域之间的网格尺寸平滑过渡^[13]。子弹和层合板的网格模型如图 3 所示。

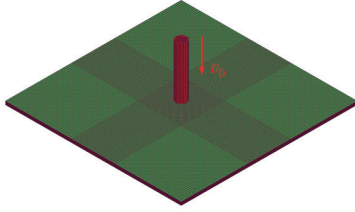


图 3 子弹和CFRP层合板的网格模型

Fig. 3 Mesh model of bullet and CFRP laminates

2 材料模型

2.1 CFRP层合板有限元模型

侵彻过程中,CFRP的破坏模式主要为分层破坏、基体开裂、纤维断裂以及弯曲断裂。Hashin损伤准则能够综合考虑复合材料在不同方向上的拉伸和压缩强度,以及剪切强度,允许对CFRP层合板在冲击载荷下的损伤特性进行深入分析,以预测材料的损伤行为及理解材料的失效机理,故采用Hashin损伤准则^[14]作为CFRP层合板损伤判断的依据,其表达形式如下:

纤维拉伸失效

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{XY}}\right)^2 \geq 1 (\sigma_{11} > 0), \quad (1)$$

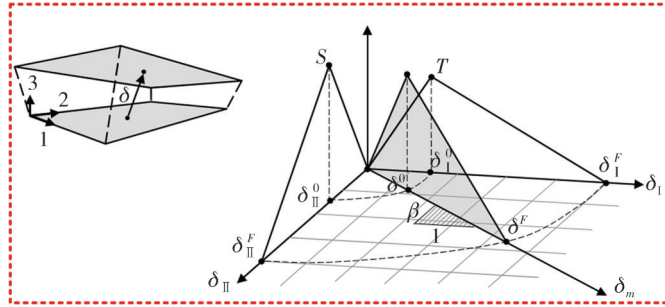


图 4 混合受力模式牵引分离定律

Fig. 4 The traction separation law in mixed force mode

在该模型中,总混合模式相对位移 δ_m 为 $\delta_m = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}$,其中 $\delta_1 = \delta_3$ 是法向间距(模式I), $\delta_2 = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}$ 是切向间距(模式II),混合模式损伤起始位移为

$$\delta^0 = \delta_1^0 \delta_2^0 \sqrt{\frac{1 + \beta^2}{(\delta_2^0)^2 + (\beta \delta_1^0)^2}}, \quad (5)$$

式中: $\delta_1^0 = T/E_N$ 和 $\delta_2^0 = S/E_T$ 是单一模式损伤起始位移, $\beta = \delta_2^0 / \delta_1^0$ 是混合模式损伤起始位移,最终混合模式下的总破坏位移 δ^F 为

当 $I_{XMU} > 0$ 时,

纤维压缩失效

$$\sigma_{11} = -X_C (\sigma_{11} < 0), \quad (2)$$

基体拉伸失效

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{XY}}\right)^2 = 1 (\sigma_{22} > 0), \quad (3)$$

基体压缩失效

$$\frac{\sigma_{22}}{Y_C} \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{YZ}}\right)^2 - 1 \right] + \left(\frac{\sigma_{22}}{2S_{YZ}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{YZ}}\right)^2 \geq 1, \quad (4)$$

$(\sigma_{22} \leq 0),$

式中: σ_{11} 、 σ_{22} 和 τ_{12} 分别为层合板所受纵向正应力、横向正应力和剪切应力; X_T 、 X_C 、 Y_T 、 Y_C 分别为纵向抗拉强度、纵向抗压强度、横向抗拉强度和横向抗压强度; S_{XY} 、 S_{YZ} 分别为层合板面内剪切强度和单层板沿垂直纤维方向的最大剪应力。

2.2 内聚力单元有限元模型

侵彻过程中,层合板发生分层现象,在层与层之间构建零厚度内聚力单元模拟层间的粘接行为和分层过程, Cohesive单元可以定义损伤和裂纹扩展的演化,以研究各层之间的破坏现象,层合板采用的材料本构为零厚度内聚力模型(MAT_COHESIVE_MIXED_MODE)^[15],模型引用混合受力模式牵引分离定律,如图 4 所示。

$$\delta^F = \frac{2(1 + \beta)^2 \left[\left(\frac{E_N}{G_{C1}}\right)^{I_{XMU}} + \left(\frac{\beta^2 \cdot E_T}{G_{C2}}\right)^{I_{XMU}} \right]^{\frac{1}{I_{XMU}}}}{\delta^0}. \quad (6)$$

当 $I_{XMU} < 0$ 时,

$$\delta^F = \frac{2 \left[C_{C1} + (G_{C2} - G_{C1}) \left(\frac{\beta^2 \cdot E_T}{E_N + \beta^2 \cdot E_T} \right)^{I_{XMU}} \right]}{\delta^0 \left(\frac{1}{1 + \beta^2} E_N^\gamma + \frac{\beta^2}{1 + \beta^2} E_T^\gamma \right)^{\frac{1}{\gamma}}}, \quad (7)$$

式中: γ 为B-K(Benzeggagh-Kenane)定律的附加指

数; E_N 、 E_T 分别为法向及切向刚度; G_{C1} 、 G_{C2} 分别为I型及II型断裂能; I_{XMU} 为混合模型准则指数。

内聚力单元模型涉及到的材料参数包括密度、弹性模量、强度和断裂能等。弹板接触定义为侵蚀接触中的面面接触(CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE), 模拟侵彻时层合板失效断裂, 弹板之间挤压变形^[16]。层合板基体材料为LY1564 SP/Aradur3486, 增强材料为T700碳纤维, 材料参数如表1所示。

表1 层合板模型计算所用的材料参数^[5,9-10]

Tab.1 Material parameters used in the calculation of laminates model

材料参数	数值	材料模块
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1.76	MAT054/055
E_{11}/GPa	140	MAT054/055
E_{22}/GPa	9	MAT054/055
E_{33}/GPa	9	MAT054/055
ν	0.21	MAT054/055
G_{12}/GPa	4.6	MAT054/055
G_{13}/GPa	3.082	MAT054/055
G_{23}/GPa	4.6	MAT054/055
X_C/GPa	0.795	MAT054/055
X_T/GPa	0.86	MAT054/055
Y_C/GPa	0.795	MAT054/055
Y_T/GPa	0.86	MAT054/055
S_C/GPa	0.098	MAT054/055
E_N/GPa	10	MAT138
E_T/GPa	10	MAT138
γ	1	MAT138
$G_{C1}/(J \cdot m^{-2})$	260	MAT138
$G_{C2}/(J \cdot m^{-2})$	1002	MAT138
T/MPa	30	MAT138
S/MPa	60	MAT138
I_{XMU}	1	MAT138

注: E_{ii} ($i=1, 2, 3$) 为不同*i*方向的弹性模量; ν 为泊松比; G_{ij} ($i=1, 2; j=2, 3$) 为不同方向的剪切模量; E_N 为内聚力单元平面的法向刚度; E_T 为内聚力单元平面内的切向刚度; γ 为Benzeggagh-Kenane定律的附加指数; T 为法向峰值牵引力; S 为切向峰值牵引力; I_{XMU} 为混合模式标准指数。

3 计算结果

3.1 弹道极限

弹道极限速度 v_{50} 是一种衡量弹头或弹道导弹穿透能力的指标^[17], 对于赋予某一初速度的弹体和CFRP层合板, 弹道极限定义为弹头在撞击层合板时对层合板形成穿透概率为50%时的着靶速度。子弹以不同的撞击速度垂直侵彻CFRP层合板, 表2为两种厚度的CFRP层合板在不同撞击速度下的数值模拟结果。

采用经典Lambert-Jonas弹道极限方程^[18]拟合弹道冲击的剩余-撞击速度关系, 其表达式为

$$v_{res} = a(v_{imp}^p - v_{bl}^p)^{\frac{1}{p}}, \quad (8)$$

式中: v_{imp} 为弹体撞击速度; v_{res} 为弹体剩余速度; v_{bl} 为靶板的弹道极限; a 和 p 为相关弹道常数, 通过对 v_{imp} 和 v_{res} 进行线性回归获得。

表2 平头子弹侵彻CFRP层合板的数值模拟结果

Tab.2 Numerical simulation results of flat projectile penetrating CFRP laminates

编号	1 mm CFRP		2 mm CFRP	
	$v_{imp}/(m \cdot s^{-1})$	$v_{res}/(m \cdot s^{-1})$	$v_{imp}/(m \cdot s^{-1})$	$v_{res}/(m \cdot s^{-1})$
1	30	-2.4	30	-4.6
2	40	-6.5	40	-6.1
3	45	-3.9	45	-6.3
4	46	-7.8	50	-7.7
5	47	-8.8	56	-7
6	47.5	3.7	59	-8.8
7	48	7.1	62	-7.3
8	50	13.3	63	7.1
9	52	18.7	64	13.9
10	60	35.9	65	18.5
11	80	66.0	80	47.9
12	100	88.1	100	76.4
13	120	110.6	120	103.2
14	140	132.9	140	126.4
15	160	153.7	160	146.3

注: v_{imp} 为子弹冲击速度; v_{res} 为子弹剩余速度。剩余速度为负值表示层合板未被穿透, 正值表示子弹穿透层合板。

结合表2与式(8)进行回归分析得到层合板的弹道极限方程, 图5为平头子弹侵彻CFRP层合板的撞击速度与剩余速度的关系曲线。

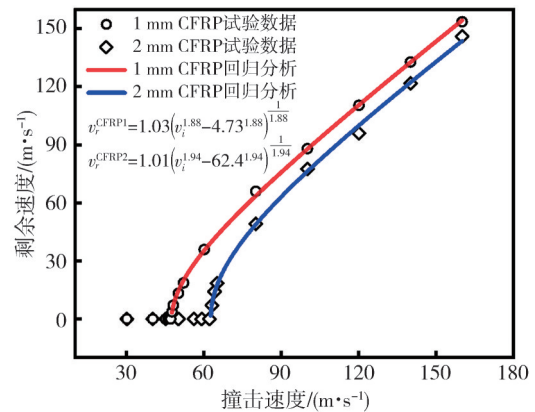


图5 平头子弹侵彻CFRP层合板的剩余速度与撞击速度的关系曲线
Fig.5 The relationship curve between the remaining velocity and the impact velocity of flat-nosed projectile penetrating the CFRP laminates

层合板的数值模拟数据与回归曲线较为吻合, 两种层合板的弹道极限分别为47.3 m/s和62.4 m/s, 相比1 mm CFRP层合板, 2 mm CFRP层合板的弹道极限提高了31.9%, 是1 mm CFRP

层合板的 1.32 倍。

3.2 能量吸收

在冲击过程中,子弹部分动能被层合板吸收。层合板能量吸收 E 、能量吸收率 η 和比能量吸收 SEA 可由式(9)~式(11)计算^[19]。

$$E = \frac{1}{2} m_p (v_{imp}^2 - v_{res}^2), \tag{9}$$

$$\eta = \frac{E}{\frac{1}{2} m_p v_{imp}^2}, \tag{10}$$

$$I_{SEA} = \frac{E}{m_{CFRP}}, \tag{11}$$

图 6 为不同冲击能量下两种厚度的 CFRP 层合板的吸能状况,当子弹的动能不足以穿透 CFRP 层合板,导致其被反弹时,层合板会吸收大部分的子弹冲击能量。在子弹穿透之前,层合板吸收的能量随冲击能量的增加而增加;增大弹体冲击能量直至子弹穿透层合板,层合板吸能达到峰值,此后增加冲击能量,层合板吸能进入相对平缓的阶段。子弹冲击未穿透层合板时,冲击能主要以应力波的形式在层合板内部逐渐扩散,弹速较低,应力波从撞击点扩散的速度缓慢,层合板破坏较大,能量吸收多;当冲击能较大时,侵彻时间短,应力波扩散速度较快,较小的区域内破坏严重,能量吸收少。对比两种厚度的吸能曲线,子弹穿透层合板后,2 mm CFRP 层合板吸能是 1 mm CFRP 层合板吸能的 1.74 倍,即 CFRP 层合板的吸能随层合板厚度的增加而增加。

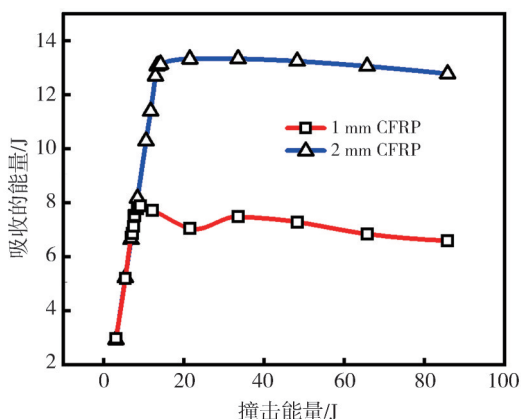


图 6 不同厚度 CFRP 层合板在不同冲击能量下的吸能状况
Fig. 6 Energy absorption of CFRP laminates with different thicknesses under different impact energies

图 7 为弹体冲击能量对 2 mm 层合板能量吸收的影响关系曲线,可以看出,当子弹的冲击能

较低时,层合板的能量吸收率较高。撞击能量为 3.02 J 时,子弹未穿透层合板,层合板的能量吸收率为 97.5%;增大撞击能至 12.87 J,层合板的能量吸收率达到了峰值 98.0%;子弹穿透层合板后,增大撞击能至 85.76 J,层合板的能量吸收率急剧下降至 14.9%。鉴于层合板面密度的区域差异性,运用比吸能值衡量层合板的吸能情况。单位质量结构吸能称为结构的比能量吸收(SEA),也称为比吸能,反映了结构受到外界冲击时能量吸收的能力^[20]。由图 7 可知,层合板的比吸能值会随着子弹冲击能的改变而有所波动,随着弹体入射速度的增加,层合板的比吸能值呈现先增大后减小的趋势。

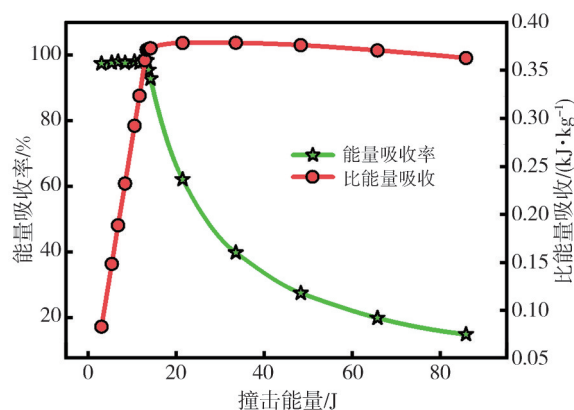


图 7 弹体冲击能量与 2 mm 层合板能量吸收的关系曲线
Fig. 7 The relationship curve between bullet impact energy and the energy absorption of a 2 mm laminates

3.3 侵彻过程分析

3.3.1 平头子弹侵彻 CFRP 层合板的损伤演化过程

图 8 为平头子弹侵彻 1 mm CFRP 层合板不同时刻下的应力云图。可以看出:当 $t=3 \mu s$ 时,子弹与层合板接触的瞬间,其前端所受的压力激增,层合板受撞击区域应力集中,此后,应力沿层合板厚度方向扩散,当弹板撞击点的接触应力超过层合板材料的压缩强度极限时,接触区域附近发生破坏;当 $t=8 \mu s$ 时,弹板接触点的纤维材料经历了拉伸变形,同时层合板的背部区域形成局部鼓包;当 $t=12 \mu s$ 时,受冲击载荷影响,层合板受击区域发生纤维拉伸破坏,分层初步形成;当 $t=26 \mu s$ 时,层合板背面纤维带伸出,拉伸破坏现象显著,层合板的分层现象加剧;当 $t=38 \mu s$ 时,子弹穿透层合板,层合板背面纤维束发生断裂脱落。

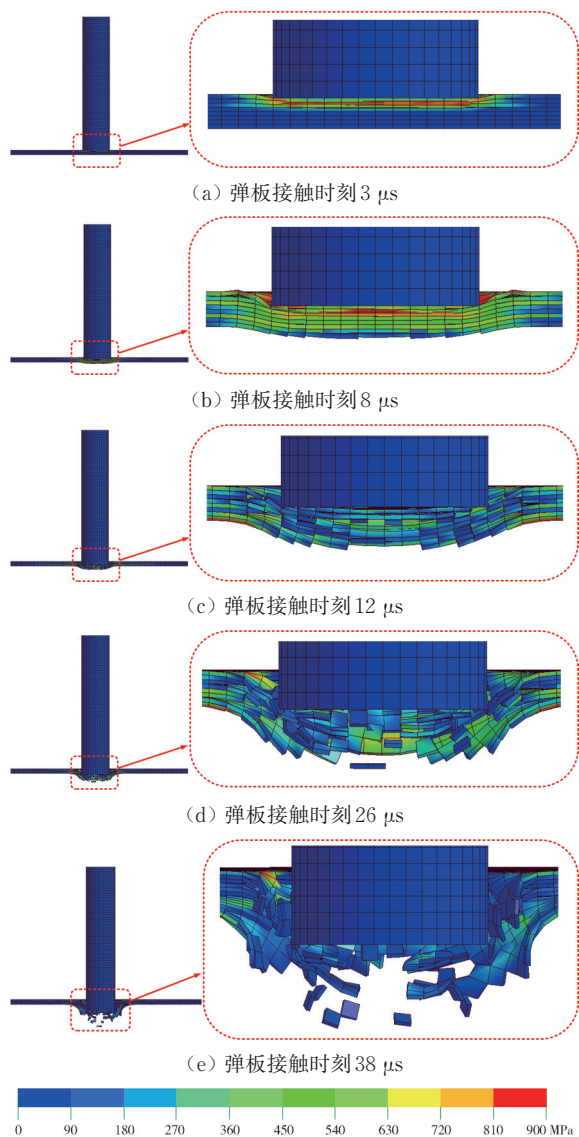


图8 平头子弹以80 m/s冲击速度侵彻1 mm CFRP层合板不同时刻的应力云图

Fig. 8 Stress nephogram of flat-nosed projectile penetrating a 1 mm CFRP laminates at different moments with an impact velocity of 80 m/s

图9为平头子弹侵彻2 mm CFRP层合板不同时刻的应力云图。可以看出：当 $t=3 \mu\text{s}$ 时，子弹撞击到层合板，撞击区域层合板产生局部损伤，迎弹面形成了初始损伤弹坑；当 $t=8 \mu\text{s}$ 时，层合板损伤扩展，弹坑加深扩大，弹板接触区域产生纤维拉伸变形，弹板接触区域的纤维被切断；当 $t=18 \mu\text{s}$ 时，受冲击载荷影响，层合板背部发生弯曲形变，层合板隆起形成背凸；当 $t=42 \mu\text{s}$ 时，弹板接触位置产生分层裂纹，背面纤维拉伸断裂，产生纤维束；当 $t=54 \mu\text{s}$ 时，子弹穿透层合板，撞击处纤维严重压溃，分层现象显著，背面纤维束产生劈裂。以上结果与谢文波等^[21]通过C扫描观察到侵彻后的CFRP层合板损伤区域的损伤

模式主要为纤维断裂、层间分层以及冲塞等具有一致性，验证了本文数值模拟结果的可靠性。

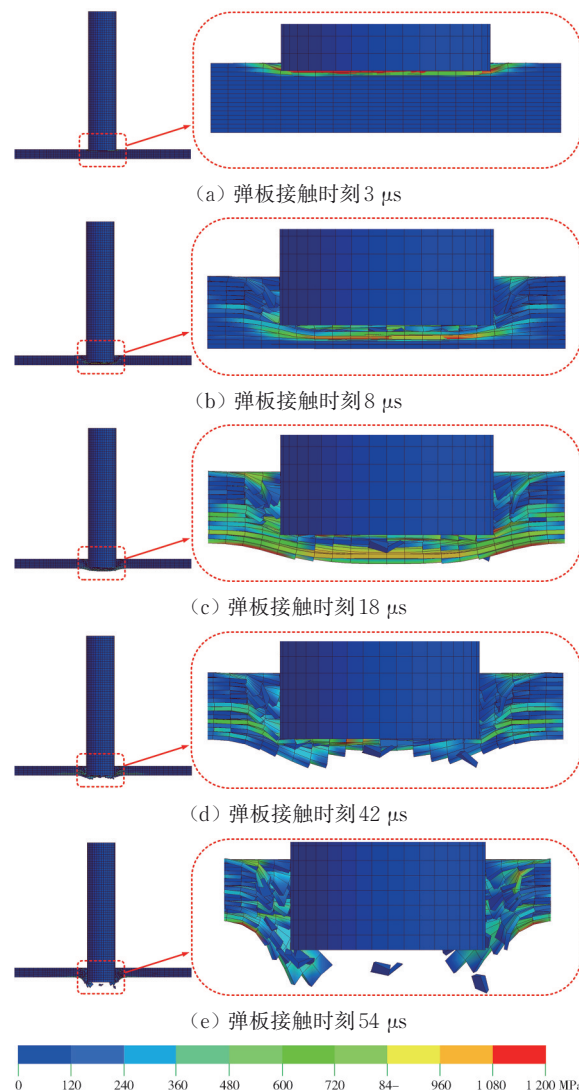


图9 平头子弹以80 m/s冲击速度侵彻2 mm CFRP层合板不同时刻的应力云图

Fig. 9 Stress nephogram of flat-nosed bullets penetrating a 2 mm CFRP laminates at different moments with an impact velocity of 80 m/s

3.3.2 平头子弹侵彻CFRP层合板的各层分层状况

侵彻过程中层合板正面由于剪切冲塞作用致使纤维层损坏，子弹冲击载荷导致层合板纤维拉伸，背面的纤维层产生背凸，当达到拉伸强度极限时，纤维破坏。当纤维层全部破坏后，鼓包变形区域逐渐缩小，层合板中产生分层破坏。

图10为平头子弹侵彻1 mm CFRP层合板后各层之间的分层状况。侵彻过程中，层合板下方的铺层区域破坏程度逐渐增大；层合板各层的受力状态与层合板各纤维层的铺设角度有关，相邻不同铺层角度的纤维受轴向力和剪切力耦合作用，由云图中

的损伤破坏区域可以明显观察到应力变化的情况。

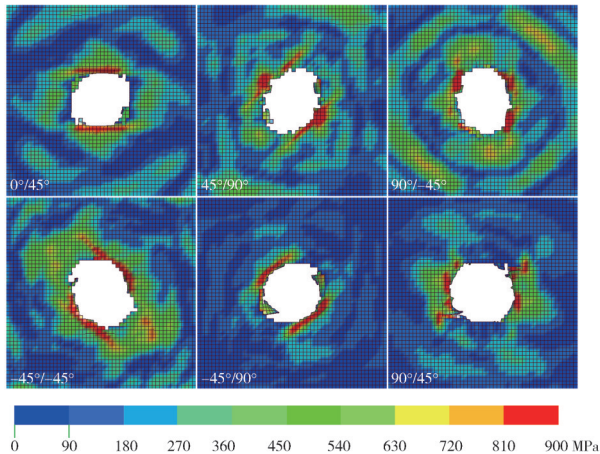


图 10 子弹以 80 m/s 冲击速度侵彻 1 mm CFRP 层合板后各层间的分层状况

Fig. 10 Delamination status of each layers after projectile penetrating 1 mm CFRP laminates at an impact velocity of 80 m/s

图 11 为平头子弹侵彻 2 mm CFRP 层合板后各层之间的分层状况。高速侵彻冲击作用下,层合板处于下方铺层区域的损伤破坏面积逐渐扩大,相比 1 mm CFRP 层合板,2 mm CFRP 层合板沿纤维方向向周边扩展的程度更大。受纤维铺层角度的影响,碳纤维复合材料表现出明显的各向异性,上下纤维层间的受力状态因铺层差异性而有所不同。

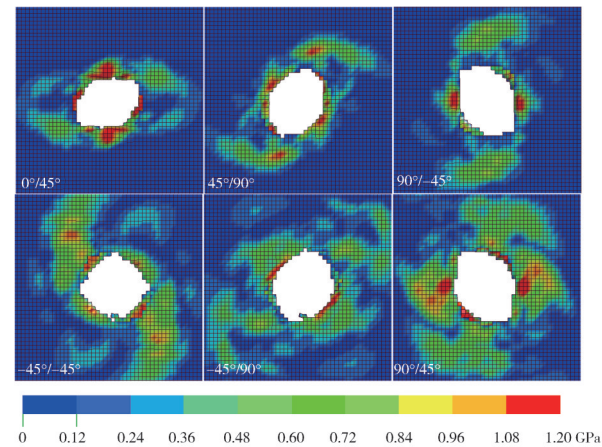


图 11 子弹以 80 m/s 冲击速度侵彻 2 mm CFRP 层合板后各层间的分层状况

Fig. 11 Delamination status of each layers after bullet penetrating 2 mm CFRP laminates at an impact velocity of 80 m/s

4 结 论

本文利用数值模拟计算了平头子弹高速冲击侵彻 CFRP 层合板的过程,根据经典弹道理论,分析了高速冲击侵彻下层合板的吸能特性,探索了

层合板的侵彻失效机理,结论如下:

1) 通过数值模拟计算,得到了弹体速度为 30~160 m/s 时的平头弹体对两种厚度的 CFRP 层合板垂直侵彻的弹道极限,层合板的弹道极限随着层合板厚度的增加而增加。

2) 层合板的吸能状况与冲击能量的大小有密切关系。当子弹的冲击速度低于弹道极限即冲击能量较小时,层合板吸收的能量随着冲击能量的增加呈现上升趋势,当冲击速度超过弹道极限,层合板的能量吸收处于平缓状态。

3) 平头子弹侵彻 CFRP 层合板的损伤模式主要为纤维的拉伸断裂、基体的压溃与分层以及纤维束之间的劈裂。层合板内部分层状况与纤维铺层的铺设角度有关,层合板内部的分层区域沿纤维方向向周边扩展。

参考文献:

[1] GONG Y, ZHANG B, ZHAO L, et al. R-curve behaviour of the mixed-mode I/II delamination in carbon/epoxy laminates with unidirectional and multidirectional interfaces [J]. Composite Structures, 2019, 223: 110949.

[2] ANUSE V S, SHANKAR K, VELMURUGAN R, et al. LVI and CAI analysis of woven carbon fiber reinforced composite laminates with different stacking sequence [J]. Key Engineering Materials, 2023, 969: 93-100.

[3] SHARMA A P, VELMURUGAN R, SHANKAR K, et al. High-velocity impact response of titanium-based fiber metal laminates. Part I: experimental investigations [J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 152: 103845.

[4] SUSHANT S, DHAKATE S R, ABHIJIT M, et al. Improved static and dynamic mechanical properties of multiscale bucky paper interleaved Kevlar fiber composites [J]. Carbon, 2019: 152631-152642.

[5] HUANG Y, ESHUN F T, HU J, et al. Research on low-velocity impact response of novel short-fiber-reinforced composite laminates [J]. Polymers, 2023, 15(4): 840.

[6] 邓云飞, 蔡雄峰, 李想, 等. 玻璃纤维-不锈钢网混杂增强环氧树脂层合板对球形弹斜冲击响应特性实验研究 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(9): 2862-2874.

DENG Yunfei, CAI Xiongfeng, LI Xiang, et al. Experimental study on oblique impact of steel balls on glass fiber-stainless steel mesh hybrid reinforced epoxy

- laminates [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(9): 2862-2874. (in Chinese)
- [7] 拓宏亮, 马晓平, 卢智先. 基于连续介质损伤力学的复合材料层合板低速冲击损伤模型[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(7): 1878-1888.
- TUO Hongliang, MA Xiaoping, LU Zhixian. A model for low velocity impact damage analysis of composite laminates based on continuum damage mechanics[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(7): 1878-1888. (in Chinese)
- [8] KAZEMI M E, MEDEAU V, CHEN Y, et al. Ballistic performance of bio-inspired hybrid interleaved composite structures suitable for aerospace applications [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 179: 107992.
- [9] ZOU X, GAO W, XI W. Influence of various damage mechanisms on the low-velocity impact response of composite laminates [J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(1): 722-737.
- [10] ZHOU J, LIU B, WANG S. Finite element analysis on impact response and damage mechanism of composite laminates under single and repeated low-velocity impact [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 129: 107810.
- [11] 黄晓明, 方志威, 侯海量, 等. 陶瓷/钢复合装甲抗高速破片侵彻性能数值模拟[J]. *舰船科学技术*, 2019, 41(9): 34-38.
- HUANG Xiaoming, FANG Zhiwei, HOU Hailiang, et al. Numerical modelling on the anti-penetration performance of ceramic/steel armor subjected to the impact of fragment [J]. *Ship Science And Technology*, 2019, 41(9): 34-38. (in Chinese)
- [12] 王雪, 智小琦, 徐锦波, 等. 球形破片侵彻多层板弹道极限的量纲分析[J]. *高压物理学报*, 2019, 33(6): 157-165.
- WANG Xue, ZHI Xiaoqi, XU Jinbo, et al. Dimensional analysis of ballistic limit of spherical fragments penetrating multi-layer plate [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(6): 157-165. (in Chinese)
- [13] 李亚, 任杰, 马大为, 等. 多角度高速侵彻金属靶的有限元模拟和实验研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2017, 40(5): 72-77.
- LI Ya, REN Jie, MA Dawei, et al. FEM simulation and experimental study of multiangular high velocity penetration of metallic targets [J]. *Ordnance Material Science And Engineering*, 2017, 40(5): 72-77. (in Chinese)
- [14] HASHIN Z. Fatigue failure criteria for unidirectional fiber composites [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47(4): 329-334.
- [15] LSTC. LS-DYNA user manual (VOLUME II Material Models) [M]. USA: LSTC, 2017: 810-814.
- [16] 柳兴旺, 邓旭艳, 秦青阳, 等. 块石混凝土遮弹层界面对抗侵彻性能影响的数值模拟研究[J]. *高压物理学报*, 2023, 37(2): 107-112.
- LIU Xingwang, DENG Xuyan, QIN Qingyang, et al. Numerical investigation on effect of interface modelling of rock-rubble shielding overlays on the anti-penetration capability [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(2): 107-112. (in Chinese)
- [17] 彭刚, 王梅, 冯家臣, 等. 弹道极限速度V50在材料抗弹性能评价中的应用研究[J]. *警察技术*, 2011(2): 12-15.
- PENG Gang, WANG Mei, FENG Jiachen, et al. Research on the application of ballistic ultimate velocity V50 in the evaluation of material elastic resistance [J]. *Police Technology*, 2011(2): 12-15. (in Chinese)
- [18] SEVKAT E, LIAW B, DELALE F, et al. A combined experimental and numerical approach to study ballistic impact response of S2-glass fiber/toughened epoxy composite beams [J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(7/8): 965-982.
- [19] DOMUN N, KABOGLU C, PATON K R, et al. Ballistic impact behaviour of glass fibre reinforced polymer composite with 1D/2D nanomodified epoxy matrices [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 167: 497-506.
- [20] 周长发, 林盛. 新型负泊松比结构冲击动力学分析[J]. *中国机械*, 2022(2): 54-57.
- ZHOU Changfa, LIN Sheng. Impact dynamics analysis of novel negative Poisson's ratio structures [J]. *Machine China*, 2022(2): 54-57. (in Chinese)
- [21] 谢文波, 张伟, 姜雄文. 钢球斜侵彻碳纤维复合材料板的实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(3): 647-653.
- XIE Wenbo, ZHANG Wei, JIANG Xiongwen. Oblique penetration on CFRPs by steel sphere [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2018, 38(3): 647-653. (in Chinese)