

高压物理学报

弹丸高速撞击下玻璃复合装甲的损伤机理

黄友奇 史刘彤 高玉波 李志豪 黄翔翔

Damage Mechanism of Glass Composite Armor Subjected to Projectile at High Impact Velocity

HUANG Youqi, SHI Liutong, GAO Yubo, LI Zhihao, HUANG Aoxiang

引用本文:

黄友奇, 史刘彤, 高玉波, 等. 弹丸高速撞击下玻璃复合装甲的损伤机理[J]. 高压物理学报, 2025, 39(2):024101. DOI: 10.11858/gywlb.20240836

HUANG Youqi, SHI Liutong, GAO Yubo, et al. Damage Mechanism of Glass Composite Armor Subjected to Projectile at High Impact Velocity[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(2):024101. DOI: 10.11858/gywlb.20240836

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240836>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Kevlar纤维及碳纤维背衬下SiC陶瓷和弹丸的破碎特性

Crushing Characteristics of SiC Ceramics and Projectiles under Kevlar/Carbon Fiber Backing

高压物理学报. 2023, 37(6): 064101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230736>

水泥砂浆抗弹性能研究

Research on the Ballistic Performance of Cement Mortar

高压物理学报. 2021, 35(2): 024205 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200609>

陶瓷球金属复合结构的抗弹性能和梯度设计

Ballistic Performance Analysis and Gradient Optimization Design of Ceramic Ball and Metal Composite Armor

高压物理学报. 2021, 35(5): 054201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210739>

冲击载荷下平板玻璃裂纹扩展和破坏形态的数值模拟

Numerical Simulation of Crack Propagation and Damage Behavior of Glass Plates under Impact Loading

高压物理学报. 2022, 36(5): 054203 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220558>

玻璃纤维增强聚碳酸酯复合材料的动态拉伸力学行为特征及其失效机理

Dynamic Tensile Properties and Failure Mechanism of Glass Fiber Reinforced Polycarbonate Composite

高压物理学报. 2023, 37(4): 044101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230648>

基于原位测量的复合材料冲击损伤定位

Impact Damage Localization of Composite Laminates by *In-Situ* Measurement

高压物理学报. 2021, 35(5): 053401 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210787>

弹丸高速撞击下玻璃复合装甲的损伤机理

黄友奇¹, 史刘彤², 高玉波², 李志豪², 黄翱翔¹

(1. 中国建筑材料科学研究总院有限公司, 北京 100024;

2. 中北大学航空宇航学院, 山西 太原 030051)

摘要: 玻璃叠层复合装甲具有良好的透光性和抗冲击性能, 广泛应用于军事和民用防护领域。由于玻璃容易发生失效或破碎, 为了获得靶板的冲击损伤机制, 开展了钢球高速撞击下的试验和数值模拟研究。结果表明, 在第1层玻璃破碎锥和应力波传播的作用下, 第2层玻璃破碎锥体积和整体损伤面积显著大于第1层玻璃。弹丸高速撞击下, 玻璃层形成了大量径向和环向裂纹, 其中, 在 Rayleigh 波作用下形成的环向裂纹可以阻止径向裂纹传播造成的次生裂纹扩展。根据损伤程度不同, 玻璃层分为粉末区、小尺寸碎片区、大尺寸碎片区和径向裂纹区。受应力波传播、靶板弯曲变形以及破碎玻璃的体积膨胀共同作用, 玻璃层沿厚度方向出现了竖向裂纹和平行破碎锥面的斜向裂纹。玻璃之间聚氨酯黏结层可造成竖向裂纹偏转, 在一定程度上阻碍了裂纹沿厚度方向传播。玻璃/聚氨酯/聚碳酸酯之间, 受介质波阻抗不同, 导致界面的剪切作用, 胶层出现了局部分层现象。聚碳酸酯依靠自身的塑性变形聚集了破碎玻璃颗粒, 形成了局部高应力状态区域, 完成了对弹丸的持续阻碍作用。因此, 聚氨酯胶层的变形主要为破碎锥对其直接剪切作用所致。

关键词: 玻璃复合装甲; 抗弹性能; 损伤机制; 应力波传播

中图分类号: TJ04; TQ171.1; O521.9

文献标志码: A

玻璃复合装甲具有一定的透明度, 且能够有效抵御子弹、炮弹、爆炸碎片等威胁而不被穿透, 被广泛应用于军用车辆、战斗机、直升机、军舰等装备^[1-3]。其中, 车用玻璃复合装甲通常由无机玻璃、黏结层和高聚物背板组成^[4]。然而, 与常规金属装甲相比, 玻璃材料存在抗拉强度低、脆性大等弱点, 在碰撞后容易发生破坏和破碎^[5]。因此, 研究玻璃复合装甲在弹丸高速冲击作用下的损伤机制十分必要。

当前, 对玻璃复合装甲抗冲击性能的研究分为低速冲击和高速冲击2个弹速范围。低速冲击下的弹丸速度一般小于100 m/s。此时, 玻璃复合装甲主要承受弯曲破坏, 弯曲下的拉应力是玻璃失效的主要原因。研究表明, 玻璃复合装甲发生断裂时, 中间黏结层提供的拉应力可有效防止玻璃破碎后脱粘, 从而保证完全失效玻璃层能够承受一定的冲击载荷^[6]。Chen等^[7]发现, 随着冲击速度的增加, 玻璃层径向裂纹和圆形裂纹的开裂速度都有所增加, 但径向裂纹比圆形裂纹出现得更早、扩展速度更快。Wang等^[8]进行了带有离子性中间膜(SentryGlas® Plus, SGP)夹层的玻璃板在硬体冲击下的损伤行为实验研究, 并采用FEM-DEM方法获得了面板的裂纹扩展和断裂模式。Cai等^[9]获得了夹层玻璃在35~60 m/s低速冲击下的空间发展状况和定量损伤参数。

在实际应用中, 玻璃复合装甲可能会受到子弹或爆炸破片的高速冲击作用^[10]。当前, 研究人员对

* 收稿日期: 2024-06-26; 修回日期: 2024-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(12172337, 11702257); 山西省应用基础研究项目(20210302123022)

作者简介: 黄友奇(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事视窗屏蔽、隐身、防弹、电加热等功能玻璃研究. E-mail: nanostar2008@163.com

通信作者: 高玉波(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事材料动态力学性能、结构侵彻及穿甲动力学、材料本构关系与损伤机理、材料和结构大变形数值模拟技术研究. E-mail: gaoyb@nuc.edu.cn

不同结构形式玻璃复合装甲的抗弹性能进行研究,包括弹道极限速度、损伤、宏观裂纹扩展等^[11-13]。Osnes 等^[14]研究了双夹层玻璃板在 7.62 mm 穿甲弹冲击下的弹道性能,获得了靶内裂纹分布随冲击速度的变化关系。Strassburger 等^[15]利用光子多普勒测速技术获得了穿甲弹撞击透明叠层玻璃板后的损伤演化过程。然而,玻璃复合装甲在高速弹丸作用下的损伤机理,尤其是裂纹扩展特性,还有待开展深入研究。

本研究针对一种玻璃复合装甲结构开展球弹丸高速撞击下的试验和数值模拟,获得不同弹速下的抗弹性能,结合试验和模拟结果,分析弹丸撞击历程、靶板侵彻深度以及沿面内和厚度方向的损伤机制,以期为透明复合装甲的应用和弹道结构设计提供参考。

1 试验设置

高速撞击试验在弹道枪设备上完成。弹道枪装置主要包括电磁激励装置、反应室、弹托、发射管、弹托分离装置、冲击靶仓、高速相机。其中,发射管的内径为 20 mm,长度为 2 500 mm。弹丸采用轴承钢材料,是直径为 6 mm 的球形,质量为 0.89 g,撞击后回收弹丸,发现其变形可忽略。采用高速相机以 60 000 帧/秒记录弹丸的撞击速度和侵彻过程。为了增强高速相机的进光量,靶仓的照明采用 2 盏 1 300 W 的冷光灯,如图 1 所示。靶板横向尺寸为 300 mm×300 mm,整体质量约为 4.0 kg,厚度方向设 5 层结构,依次为 8 mm 厚无机玻璃层、0.65 mm 厚聚氨酯(polyurethane, PU)胶层、8 mm 厚无机玻璃层、0.65 mm 厚 PU 层和 3 mm 厚聚碳酸酯(polycarbonate, PC)层。

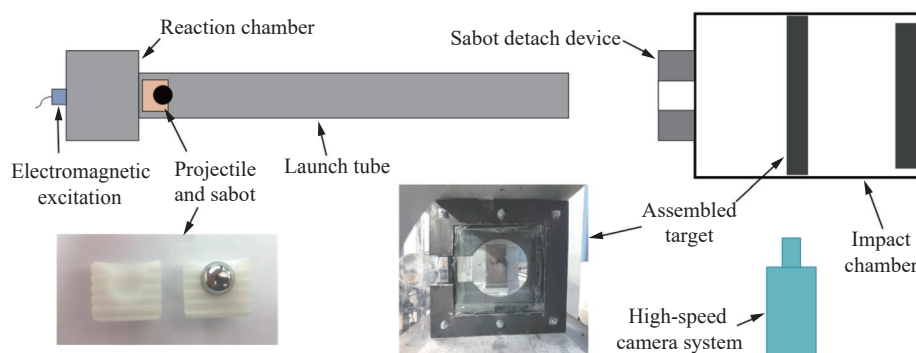


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

2 数值模拟

2.1 材料模型

2.1.1 玻璃材料

采用无机超白玻璃,由于玻璃材料具有典型脆性特征,故采用 JH2 本构模型^[16]描述其力学性能。对静水压力 p 、等效应力 σ 和静水拉应力 T 分别进行无量纲化处理,设 $p^*=p/p_{\text{HEL}}$, $\sigma^*=\sigma/\sigma_{\text{HEL}}$, $T^*=T/p_{\text{HEL}}$, p_{HEL} 和 σ_{HEL} 分别为 Hugoniot 状态下的静水压力和 HEL 弹性极限。JH2 模型由含损伤的强度模型和多项式形式的状态方程构成。

考虑到玻璃材料内的损伤累积,定义无量纲强度模型为

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (1)$$

式中: σ_i^* 和 σ_f^* 分别为未损伤和完全损伤下的无量纲等效应力; D 为损伤因子, $0 \leq D \leq 1.0$ 。

材料未发生损伤($D=0$)时

$$\sigma_i^* = A(p^* + T^*)^N (1 + C \ln \varepsilon^*) \quad (2)$$

材料完全损伤时

$$\sigma_f^* = B p^{*M} (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)$$

$$\sigma_f^* \leq S_{\text{FMAX}} \quad (3)$$

式中: A 、 B 、 M 、 N 、 C 为常数, 断裂常数 $0 \leq S_{\text{FMAX}} \leq 1.0$ 。

模型的损伤累积可表示为

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f} \quad (4)$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 为等效塑性应变在积分循环条件下的单次积分量; ε_p^f 为特定压力条件下材料的最大塑性应变, 可表示为

$$\varepsilon_p^f = D_1 (p^* + T^*)^{D_2} \quad (5)$$

式中: D_1 、 D_2 为损伤常数。

JH2 模型采用 p - μ 型多项式状态方程, 当材料未发生损伤 ($D=0$) 时, 可表示为

$$p = K_1 \mu + K_2 \mu^2 + K_3 \mu^3 \quad (6)$$

式中: K_1 、 K_2 、 K_3 为材料常数, μ 为压缩体应变。超白玻璃的 JH2 本构模型参数^[17] 见表 1, 其中, ρ 为材料密度, G 为剪切模量。

表 1 玻璃材料的 JH2 本构模型参数
Table 1 Parameters of JH2 constitutive model for glass material

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	G/GPa	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	T/GPa	$\sigma_{\text{HEL}}/\text{GPa}$	$p_{\text{HEL}}/\text{GPa}$
2488	29.6	40.8	-136.6	239.8	0.078	6	2.75
A	B	C	M	N	D_1	D_2	
1.679	1.783	0.0144	0.637	0.982	0.005	0.8	

2.1.2 PU 材料

PU 材料是一种超黏弹性体, 本研究通过 Hyperelasticity 中 2 个参数 Mooney-Rivlin 模型^[18] 进行描述, 失效模型采用最大拉应力失效准则, 2 个参数应变能函数可表示为

$$W = C_{10} (J_1 - 3) + C_{01} (J_2 - 3) + \frac{1}{d} (J - 1)^2 \quad (7)$$

式中: C_{10} 、 C_{01} 为材料常数; 不可压缩材料中, $d=1$ 。PU 材料的本构模型参数见表 2, 其中, ν 为泊松比。

表 2 PU 材料的 Mooney-Rivlin 本构模型参数
Table 2 Parameters of Mooney-Rivlin constitutive model for PU material

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	ν	C_{10}/MPa	C_{01}/MPa
1100	0.495	1.6	0.06

2.1.3 PC 材料

由于弹丸均未穿透玻璃层靶板, 因此仅考虑应变硬化和应变率效应, 采用简化 JC 本构模型^[19] 描述 PC 材料。忽略温度效应的影响时, 材料强度模型可表示为

$$\sigma = [A_1 + B_1 (\varepsilon_p)^{N_1}] (1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}_p^*) \quad (8)$$

式中: ε_p 为等效应变, $\dot{\varepsilon}_p^* = \dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_0$, $\dot{\varepsilon}_p^*$ 为无量纲应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; A_1 、 B_1 、 C_1 、 N_1 为材料常数。PC 材料的简化 JC 本构模型参数见表 3。

表 3 PC 材料的简化 JC 本构模型参数

Table 3 Parameters of simplified JC constitutive model for PC material

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	ν	E/GPa	A_1/MPa	B_1/MPa	N_1	C_1
1200	0.38	2.34	56	176	2.67	0.09

2.2 有限元模型

采用非线性有限元分析软件 LS-DYNA 进行数值模拟分析,模拟工况与试验设置一致。由于玻璃层靶板的裂纹扩展有一定的离散性,因此,采用全模型进行数值模拟,如图 2 所示。为计算玻璃在弹丸撞击过程中的裂纹扩展和传播,整个靶板的网格尺寸设置为 0.3 mm。靶板边侧设置为固定边界约束。弹丸、玻璃层和 PC 层材料均采用 Lagrange 网格描述;弹丸与靶板之间设置 ERODING_SURFACE_TO_SURFACE 侵蚀接触;PU 胶层采用壳单元进行建模,并设置 CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK 接触模拟分层损伤,该关键字通过定义 NFLS、SFLS 2 个参数确定层间失效,即

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{\sigma_{\text{NFLS}}}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{\sigma_{\text{SFLS}}}\right)^2 \geq 1 \quad (9)$$

式中: σ_n 为拉应力, σ_s 为剪应力, σ_{NFLS} 为界面失效拉应力, σ_{SFLS} 为界面失效剪切应力。

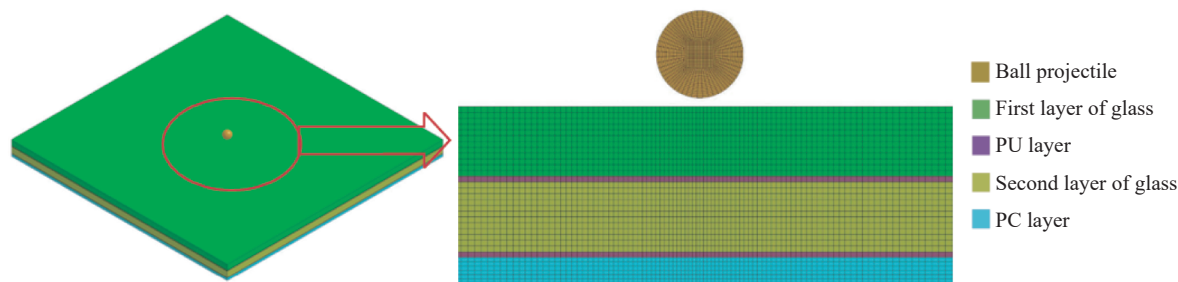


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

由于玻璃在弹丸高速撞击下会出现破碎以及裂纹扩展,为使数值模拟与试验现象吻合,在玻璃层建模及运算过程中引入 FEM-SPH 自适应耦合算法,该算法将等效塑性应变达到失效的单元转化为 SPH 粒子。与传统有限元方法相比,该算法生成 SPH 粒子的质量、位置、速度、应力均与畸变单元相应节点的物理量保持一致,并由质量守恒定律获得粒子的光滑长度^[20]

$$h = \frac{1}{N_e} \sum_i^{N_e} r_{0i} \left(\frac{\rho_{0i}}{\rho_i} \right)^{1/3} \quad (10)$$

式中: N_e 为与粒子相关联的单元数, r_0 为初始单元尺寸, ρ_0 为初始密度。

3 结果分析

3.1 弹靶作用历程

为了验证有限元模型的有效性,对比了不同弹丸撞击速度下的试验和数值模拟结果,见表 4。由于试验回收的靶板弹着点附近的玻璃破碎成颗粒甚至粉末状,回收过程中不可避免会破坏玻璃颗粒的分布,导致侵彻深度的测量存在一定的试验误差。对于数值模拟结果,弹丸侵彻深度统一以弹头位移为准。由表 4 可知,不同弹丸撞击速度下,试验与数值模拟结果相差 20% 以内。

表 4 试验与数值模拟的侵彻深度对比

Table 4 Comparison of depth of penetration between experiment and simulation

No.	Impact velocity/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Depth of penetration		
		Exp./mm	Sim./mm	Error/%
1	336	4.9	4.1	16.30
2	413	5.8	6.1	5.20
3	517	11.3	10.2	9.70
4	634	13.4	15.3	14.20

图 3 显示了弹丸高速撞击玻璃叠层装甲的侵彻历程。在撞击瞬间,大量玻璃粉末沿撞击点反方向喷溅,并逐渐形成圆锥形弹坑。受应力波作用,第 1 层靶板形成了完整的破碎锥,在弹靶的不断相互作用下,破碎锥逐渐被侵蚀。在第 1 层玻璃破碎锥和应力波传播的共同作用下,第 2 层玻璃也出现了破碎锥,且锥体体积和损伤面积大于第 1 层玻璃。在黏结层和 PC 背板的作用下,破碎玻璃持续阻碍弹丸,使得弹丸动能不断消耗直至归零。

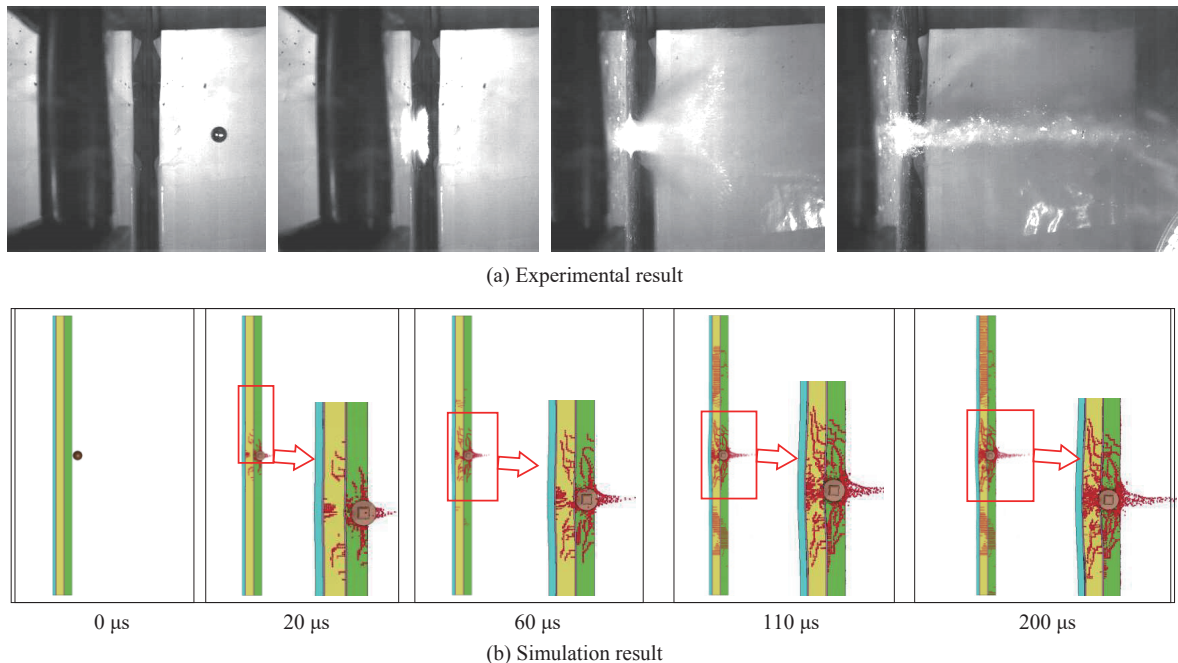


图 3 弹丸以 517 m/s 高速撞击玻璃复合装甲的侵彻历程

Fig. 3 Penetration process of glass composite armor subjected to projectile at high velocity of 517 m/s

整个撞击过程可视为弹丸动能转化为靶板变形能的历程。图 4 给出了弹丸高速撞击玻璃叠层装甲的动能历程,可分为 3 个阶段:第 1 阶段,在弹/靶接触前期,弹丸动能瞬间降低,第 1 层玻璃逐渐破碎并形成破碎锥;第 2 阶段,随着裂纹的不断扩展,在第 1 层玻璃破碎锥与应力波的共同作用下,第 2 层玻璃裂纹密度逐渐增加,出现了尺寸更大的破碎锥,随后弹丸动能降低速率逐渐变缓;第 3 阶段,弹丸动能趋于零,但第 1 层玻璃破碎锥以一定的动能继续冲击第 2 层玻璃,造成靶板内裂纹密度持续增加,此时 PC 背板也出现了鼓包变形。

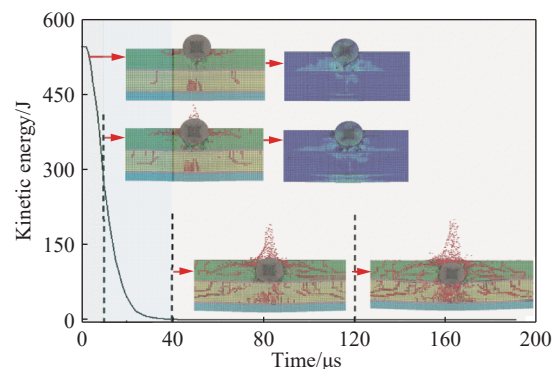


图 4 弹丸动能历程

Fig. 4 Kinetic energy history of ball projectile

3.2 玻璃层损伤机理

3.2.1 面内方向

由图 5 可知, 在钢球弹丸的高速撞击下, 玻璃透明装甲出现了大量径向和环向裂纹。裂纹由弹着点向四周逐渐扩散, 破碎尺度逐渐增大, 不同尺度区域被环向裂纹隔离开, 说明环向裂纹阻止了裂纹在面内方向的扩展。沿撞击点到靶板边缘的路径上, 玻璃破碎程度在穿过环向裂纹时逐渐减小。环向裂纹主要由 Rayleigh 波的传播造成^[21], 其传播速度远小于径向裂纹, 导致环向裂纹仅能阻止径向裂纹传播, 造成次生裂纹的扩展。从受力角度分析, 径向和环向裂纹分别由环向和径向应力引起。在高速撞击时, 玻璃破坏最先受环向应力控制, 当达到失效应力时, 径向裂纹开始向靶板内传播, 从而释放断裂能。随后, 应力波在靶板边缘反射稀疏波, 稀疏波与压缩波叠加, 引起径向应力增大, 从而使得环向裂纹加速生成。

根据损伤程度的不同, 可将玻璃分为 4 个区域: 粉末区、小尺寸碎片区、大尺寸碎片区和径向裂纹区。在弹靶接触区域, 玻璃呈粉末状并从黏结层脱落; 在小尺寸碎片区域, 受中间胶层黏结力的作用, 玻璃碎片没有发生大面积脱落; 在大尺寸碎片区域, 裂纹扩展具有一定的离散性和不连续性, 既有径向裂纹也有环向裂纹, 并沿扩展路径出现许多分支裂纹, 导致碎片的大小和形状各异; 在径向裂纹区域, 受边侧应力波反射稀疏波作用, 靠近靶板边侧玻璃呈现垂直于径向的短裂纹, 但未形成封闭的环向裂纹。

3.2.2 厚度方向

将靶板在弹丸撞击点处切割, 为防止切割过程中玻璃崩落, 向靶板破损严重的区域注射白色硅胶, 以保证靶板的完整性。由图 6 可知, 在撞击点位置, 由于裂纹扩展速度大于弹丸侵彻速度, 在强约束和惯性作用的影响下, 玻璃破碎成粉末。胶层出现破裂和层间撕裂, 破碎玻璃多与胶黏剂层脱离。在撞

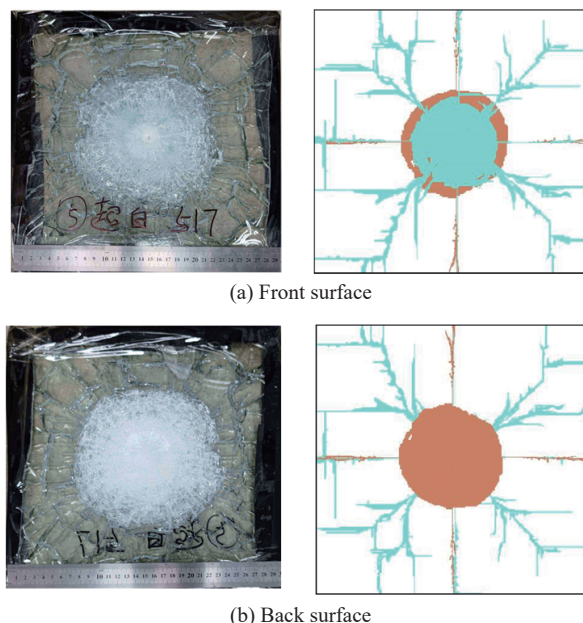


图 5 侵彻速度为 517 m/s 时玻璃复合装甲的面内损伤
Fig. 5 In-plane damage of glass composite armor at penetration velocity of 517 m/s

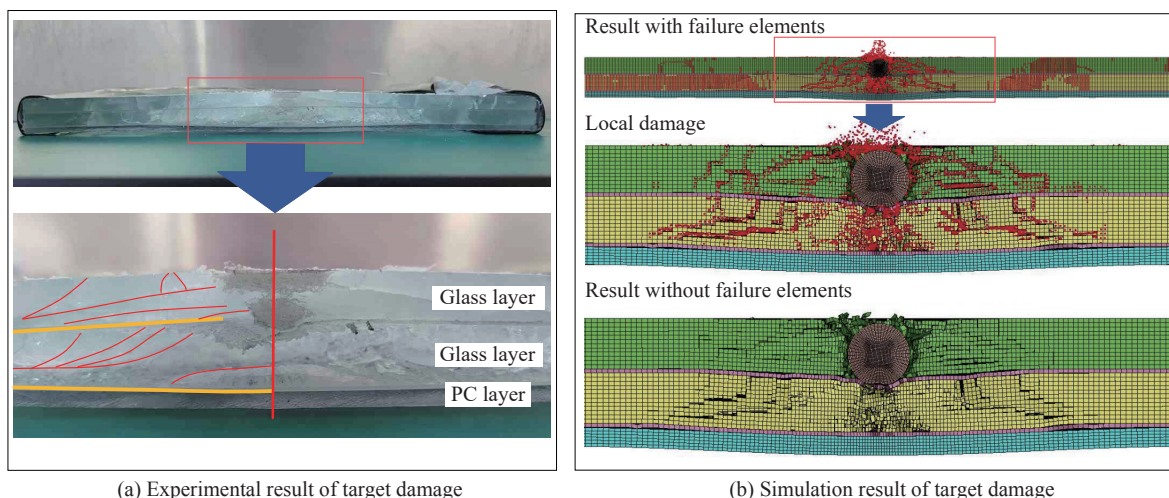


图 6 玻璃复合装甲沿厚度方向的损伤

Fig. 6 Damage of glass composite armor along thickness direction

击点周边区域, 玻璃破碎程度较撞击点区域明显降低, 损伤以竖向和斜向裂纹为主。第 1 层玻璃受 Rayleigh 波、靶板的弯曲变形以及玻璃破碎导致的体积膨胀共同作用, 出现竖向裂纹和沿破碎锥面的斜向裂纹。第 2 层玻璃受第 1 层玻璃破碎锥的挤压和应力波作用, 损伤面积增大, 形成的破碎锥尺寸也更大。对比 2 层玻璃的裂纹扩展情况, 发现竖向裂纹的扩展受到了黏结层的有效阻碍, 并出现偏转。由此可知, 黏结层可以有效阻止玻璃层间裂纹的传播。由于玻璃、PC 和 PU 胶层的波阻抗不同, 在应力波传播过程中, 层间将产生沿界面的剪切波。当剪切波应力幅值超过材料强度, 胶层出现了局部分层现象。由试验和数值模拟结果可知, PC 背板基本没有凸起。由此可知, PC 层良好的塑性变形和抗弯能力使得破碎后的玻璃无法轻易穿透靶板, 聚集玻璃颗粒, 从而形成了局部高应力状态区域, 完成了对弹丸的持续阻碍作用。

3.3 胶层变形机制

图 7 给出了靶板内 2 层 PU 胶层沿厚度和面内方向的受力和变形情况。由于 PU 为超弹性体, 压缩变形能力较强, 此处重点关注剪切变形。第 1 层 PU 层受上层玻璃破碎锥的挤压和剪切作用, 形成了一个直径约为 50 mm、深度 2.7 mm 的凹坑。由于玻璃破碎尺寸和形状各异, 胶层褶皱较多, 且褶皱处剪切力较大。第 2 层 PU 胶层的受力及变形特征与第 1 层 PU 层相似, 但是受第 2 层玻璃破碎锥的作用, 变形面积较大, 形成了直径约为 70 mm、深度为 1.8 mm 的凹坑。

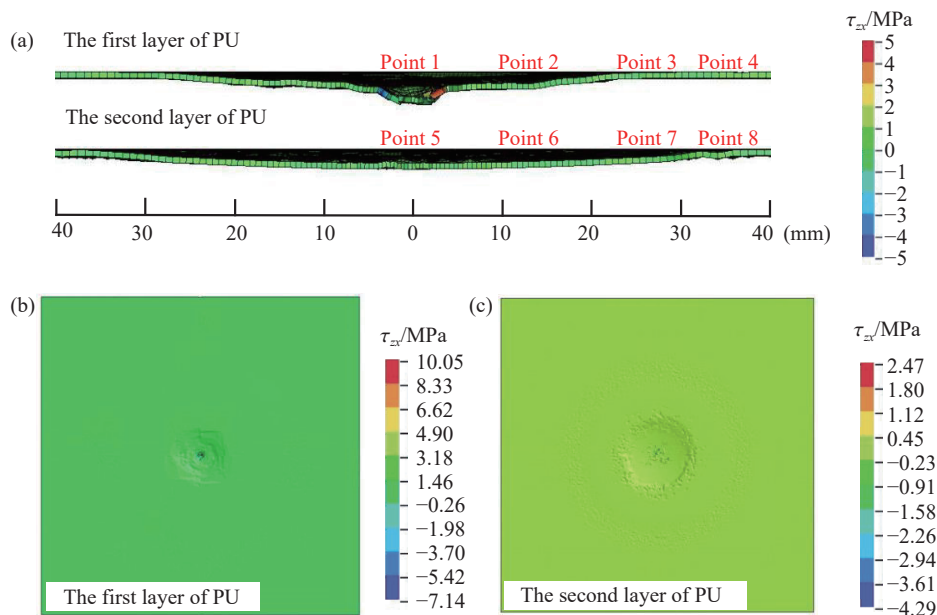


图 7 PU 胶层的受力和变形特征

Fig. 7 Stress and deformation characteristics of the PU adhesive layer

为了获得胶层不同位置的受力特征, 如图 7(a) 所示, 沿弹着点剖面每隔 12.5 mm 取 1 个测量点, 测得应力历程, 见图 8。第 1 层 PU 的点 1 在弹着点下方, 因为受到弹丸的直接挤压作用, 一开始就呈现出高压状态, 剪切位移较小, 剪应力也相对较低。然而, 由于破碎锥的直接剪切作用, 弹着点周围(点 2)所受剪应力较大, 相对点 1, 第 2 层 PU 层的点 5 较第 1 层 PU 的弹着点的垂直距离较远, 受上、下相邻玻璃层的挤压作用以及应力波在不同介质间不断的透反射作用, 出现了明显的振荡, 所受剪应力最大。在面内方向, 随着到弹着点的距离逐渐增加, 应力起跳点逐渐滞后, 随后应力幅值随时间增加而逐渐增大, 并且破碎锥底边位置出现了切应力最大值。由此可知, 胶层受力主要是破碎锥对其直接剪切作用所致。在远离玻璃破碎区域的影响范围(对应点 4 和点 8 以外位置), 剪切应力的大小可忽略。

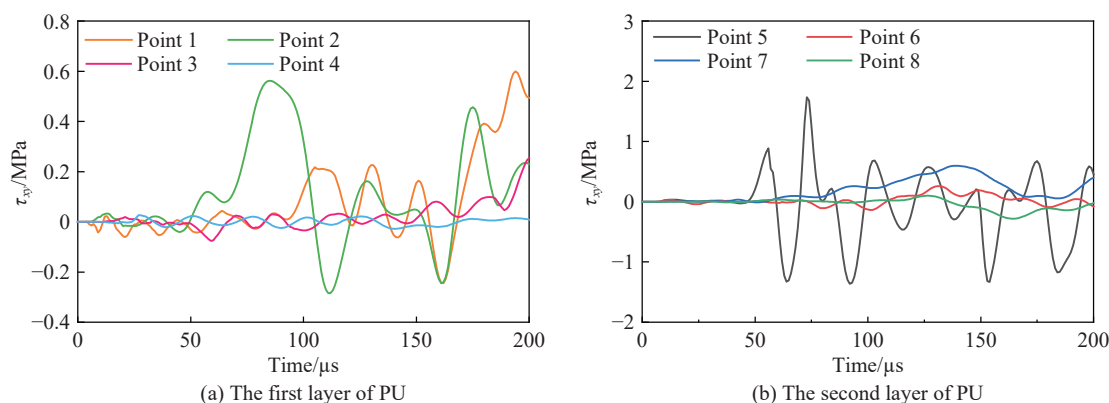


图 8 PU 胶层的剪应力历程

Fig. 8 Shear stress history of PU adhesive layer

4 结 论

针对一种玻璃叠层复合装甲结构,开展了弹丸高速撞击试验和数值模拟研究,获得了弹丸侵彻历程、靶板沿面内和厚度方向的裂纹扩展和分布特性以及胶层受力与变形机制,主要结论如下。

(1) 沿面内方向,根据玻璃损伤程度不同可分为粉末区、小尺寸碎片区、大尺寸碎片区和径向裂纹区。弹丸高速撞击下,玻璃层形成了大量径向和环向裂纹。其中,在 Rayleigh 波作用下形成的环向裂纹可以阻止径向裂纹传播造成的次生裂纹扩展。

(2) 沿厚度方向,受应力波传播、靶板弯曲变形以及破碎玻璃体积膨胀等的共同作用,玻璃层出现了竖向裂纹和平行破碎锥面的斜向裂纹。

(3) 玻璃复合装甲主要包含 PU 和 PC 有机材料层。其中,位于玻璃之间的 PU 黏结层可使竖向裂纹出现偏转,阻碍裂纹沿厚度方向传播。在玻璃/PU/PC 之间,不同介质波阻抗差异导致界面的剪切波作用,胶层出现了局部分层。PC 背板可通过自身塑性变形聚集破碎的玻璃颗粒,形成局部高应力状态区域,完成对弹丸的持续阻碍作用。

(4) PU 胶层切应力幅值出现在玻璃破碎锥体底边位置,说明胶层受力主要受破碎锥对其直接剪切作用所致,且第 2 层胶层形成的凹坑尺寸更大。

感谢中国建筑材料科学研究总院有限公司提供的试验材料和相关技术支持。

参考文献:

- [1] 韩国庆, 张先锋, 谈梦婷, 等. 透明陶瓷材料冲击响应特性及损伤演化规律研究 [J]. *力学进展*, 2023, 53(3): 497–560.
HAN G Q, ZHANG X F, TAN M T, et al. Research on impact response characteristics and damage evolution law of transparent ceramics [J]. *Advances in Mechanics*, 2023, 53(3): 497–560.
- [2] KLEMENT R, ROLC S, MIKULIKOVA R, et al. Transparent armour materials [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2008, 28(5): 1091–1095.
- [3] 牛欢欢, 张英杰, 李志强. 爆炸载荷下中空钢化夹层玻璃的动态响应 [J]. *高压物理学报*, 2021, 35(6): 064102.
NIU H H, ZHANG Y J, LI Z Q. Dynamic response of hollow tempered laminated glass under explosive load [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2021, 35(6): 064102.
- [4] GRUJICIC M, BELL W C, PANDURANGAN B. Design and material selection guidelines and strategies for transparent armor systems [J]. *Materials & Design*, 2012, 34: 808–819.
- [5] XU J, LI Y B, LIU B H, et al. Experimental study on mechanical behavior of PVB laminated glass under quasi-static and dynamic loadings [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2011, 42(2): 302–308.

- [6] LI D, ZHANG H Y, LEI X W, et al. Three-stage breakage model for laminated glass plate under low-velocity impact [J]. *Ceramics International*, 2023, 49(2): 2648–2662.
- [7] CHEN J J, XU J, YAO X F, et al. Experimental investigation on the radial and circular crack propagation of PVB laminated glass subject to dynamic out-of-plane loading [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, 112/113: 26–40.
- [8] WANG X E, YANG J, LIU Q, et al. Experimental investigations into SGP laminated glass under low velocity impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 122: 91–108.
- [9] CAI L, ZHANG Y Q, WEI X R, et al. Study on the effect of different sandwich materials on the impact resistance of laminated glass [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 360: 129603.
- [10] 邓佳杰, 章健, 张先锋, 等. YAG 透明陶瓷复合靶抗弹机理研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2022, 42(6): 620–628.
DENG J J, ZHANG J, ZHANG X F, et al. Investigation on bullet proof mechanism of YAG transparent ceramic composite targets [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2022, 42(6): 620–628.
- [11] 刘滢, 黄君伟, 郭新涛, 等. MgAl_2O_4 透明陶瓷复合结构抗弹性能的数值模拟研究 [J]. *稀有金属*, 2023, 47(4): 529–537.
LIU Y, HUANG J W, GUO X T, et al. Numerical simulation of ballistic resistance of MgAl_2O_4 transparent laminate structure [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2023, 47(4): 529–537.
- [12] WANG X E, MENG Y R, YANG J, et al. Optimal kernel extreme learning machine model for predicting the fracture state and impact response of laminated glass panels [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 162: 107541.
- [13] VEDRTNAM A, PAWAR S J. Experimental and simulation studies on fracture and adhesion test of laminated glass [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 190: 461–470.
- [14] OSNES K, HOLMEN J K, GRUE T, et al. Perforation of laminated glass: an experimental and numerical study [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 156: 103922.
- [15] STRASSBURGER E, BAUER S, POPKO G. Damage visualization and deformation measurement in glass laminates during projectile penetration [J]. *Defence Technology*, 2014, 10(2): 226–238.
- [16] GAO Y B, LI D C, ZHANG W, et al. Constitutive modelling of the $\text{TiB}_2\text{-B}_4\text{C}$ composite by experiments, simulation and neural network [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 132: 103310.
- [17] 贾哲. 弹道冲击下防弹玻璃的损伤机理和抗侵彻性能研究 [D]. 太原: 中北大学, 2023: 21–33.
JIA Z. Study on damage mechanism and anti-penetration performance of bulletproof glass under ballistic impact [D]. Taiyuan: North University of China, 2023: 21–33.
- [18] SPATHIS G D. Polyurethane elastomers studied by the Mooney-Rivlin equation for rubbers [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1991, 43(3): 613–620.
- [19] SARIKAYA M, GÜDEN M, KAMBUR Ç, et al. Development of the Johnson-Cook flow stress and damage parameters for the impact response of polycarbonate: experimental and numerical approach [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 179: 104674.
- [20] 刘赛, 张伟贵, 吕振华. 穿甲燃烧弹侵彻陶瓷复合装甲和玻璃复合装甲的 FEM-SPH 耦合计算模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(1): 014201.
LIU S, ZHANG W G, LU Z H. An FEM-SPH coupled model for simulating penetration of armor-piercing bullets into ceramic composite armors and glass composite armors [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(1): 014201.
- [21] MOHAGHEGHIAN I, CHARALAMBIDES M N, WANG Y, et al. Effect of the polymer interlayer on the high-velocity soft impact response of laminated glass plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 120: 150–170.

Damage Mechanism of Glass Composite Armor Subjected to Projectile at High Impact Velocity

HUANG Youqi¹, SHI Liutong², GAO Yubo², LI Zhihao², HUANG Aoxiang¹

(1. *China Building Materials Academy, Beijing 100024, China;*

2. *School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China*)

Abstract: The glass laminated composite armor exhibits good light transmission and impact resistance, making it widely used in military and civil protection fields. However, due to the susceptibility of glass to failure and breakage, the experiments and numerical simulations were carried out to investigate the impact damage mechanism of the target plate under high-speed impact of the steel ball projectile. Results show that under the action of breaking cone of first glass layer and stress wave propagation, the volume of breaking cone in the second layer of glass and the overall damage area are significantly larger than those in the first layer. During high-speed impact, many radial and circumferential cracks form in the glass layer. The circumferential cracks, resulting from Rayleigh waves, can prevent the propagation of secondary cracks caused by the radial crack propagation. The glass layer can be divided into the powder region, small fragment region, large fragment region and radial crack region according to different damage degrees. Along the thickness direction, the combined action of stress wave propagation, bending deformation of the target plate and volume expansion of the broken glass result in vertical and oblique cracks along the breaking cone in the glass layer. The PU bonding layer between the glass layer can deflect vertical cracks and hinder the propagation of the cracks along the thickness direction. At the interfaces between the glass/PU/PC layers, shear wave action arises due to the differences in dielectric wave impedance, leading to localized stratification within the adhesive layer. The deformation of PC layer gathers broken glass particles, forming a local high-stress area and completes the continuous obstruction of the projectile. Finally, the deformation of the PU adhesive layer is primarily induced by the shear stress caused from the breaking cone of the glass layer.

Keywords: glass composite armor; ballistic performance; damage mechanism; stress wave propagation