

纤维金属层合板准静态侵彻力学行为研究

洪熠豪^{1,2} 温昱曦¹ 赵顺秋¹ 韩建霖¹ 吴 菲^{1,2}

(1. 广东工业大学 材料与能源学院, 广州 510006)

(2. 化学与精细化工广东省实验室揭阳分中心, 揭阳 522000)

摘要:【目的】针对单一材料难以同时满足抗侵彻性能和轻量化要求的问题,研究钩织纤维金属层合板在准静态工况下的抗侵彻力学行为与能量吸收特性。【方法】首先,采用短针钩织与胶结工艺,制备了不同纤维钩织结构芯层的层合板试样,在电子万能试验机上进行了准静态侵彻试验;然后,利用SolidWorks软件建立了三维几何模型并导入Abaqus有限元分析软件,进行了准静态侵彻数值模拟,通过试验与仿真数据的对比分析,引入了吸能评价指标处理相关数据。【结果】结果表明,试验载荷-位移曲线与仿真模拟曲线吻合良好。当层间芯层为单层时,其缓冲作用不明显,层合板的峰值载荷接近于防弹板材料本身的峰值载荷;当芯层为双层或混合钩织结构时,可产生显著的缓冲效应。与参考基准(P_1 、 P_2 板峰值载荷之和40.08 kN)相比,单层芯层的PSP和PKP层合板的峰值载荷分别提高了0.52、0.54 kN,而双层或混合芯层的PSSP、PKKP、PSKP、PMP层合板的峰值载荷则分别降低了13.17、0.87、10.48、8.12 kN。芯层的加入降低了防弹板的刚度,使其发生更充分的溃缩变形,各层合板的准静态侵彻吸能量较无芯层单板分别显著提高了95.12%、80.93%、95.59%、153.2%、65.95%、30.70%,其中双层不锈钢纤维钩织层合板(PSSP)的吸能表现最佳。

关键词: 钩织结构; 有限元模拟; 层合板; 抗侵彻性; 轻量化

中图分类号: TB333 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.07.014

0 引言

纤维金属层合板是将金属薄板与纤维复合材料通过胶接、焊接等形式结合起来的一种结构^[1-2]。起初,层合夹心结构是针对航空航天工业中的疲劳问题而开发设计的。但因其具有良好的抗冲击性、低比重和优异的抗疲劳性等特点,已广泛应用于汽车、船舶、航空航天、军工等领域^[3-6]。近年来,许多国内外学者对纤维金属层合板的抗侵彻性能进行了研究。石益建^[7]为满足装甲轻量化的设计要求,在陶瓷复合装甲抗弹机制研究的基础上,提出异形陶瓷结构和整体包覆结构的方案。秦溶蔓^[8]从基础理论、制备应用及仿真验证多角度研究了超高分子量聚乙烯纤维(Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fiber, UHMWPE)混杂结构防弹复合材料的综合性能。凌天鹏^[9]基于Abaqus仿真平台,对复合板结构的弹道冲击响应进行研究,揭示了靶板内部响应规律,对脆弱区进行层间结构与材料优化以提高层合板的防弹性能。皮骏等^[10]采用Hashin、Puck混合准则分析层合板高速冲击

铺层角度和冲击角度对层板抗冲击性的影响,指出相邻铺层角度差越大,入射角度越大,层板的抗冲击性能就越强。Liu等^[11]对新设计的泡沫铝芯和金属纤维层合板夹芯板的高速冲击响应进行研究,证实与增加芯层厚度相比,夹层板中的纤维金属层压板(Fiber Metal Laminates, FML)面板能改善吸能。Abdullah等^[12]研究了一系列聚丙烯基纤维-金属层压板结构的高速冲击响应,发现低模量复合材料允许金属层在射孔过程中独立变形。Sharma等^[13]研究了钛基纤维金属层压板厚度的金属层分布对其高速弹丸冲击响应和损伤的影响。Santiago等^[14]基于铝合金和自增强聚丙烯(Self-reinforced Polypropylene, SRPP)设计了纤维金属层压板,在局部冲击载荷条件下对层压板进行了试验研究。Lemanski等^[15-16]对铝/玻璃纤维增强聚丙烯纤维-金属层压板的不同面板厚度的堆叠方式进行了爆炸冲击响应测试,确定其损坏机制的类型。Xu等^[17]研究了玻璃纤维层压铝增强环氧树脂(Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy, GLARE)结构在局部高脉冲喷砂载荷作用下的动态响应,并用

收稿日期: 2024-11-11 修回日期: 2024-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175294, 51705085); 佛山市教育局创新研究项目(2023XJZZ02); 化学与精细化工广东省实验室揭阳分中心项目(RJDT240027)

作者简介: 洪熠豪,男,1999年生,广东惠州人,硕士; 主要研究方向为金属材料塑性成形及数值模拟; E-mail: 1403735695@qq.com。

吴菲(通信作者),女,1981年生,广东广州人,博士,讲师; 主要研究方向为新型轻质材料与结构设计、制备、性能、应用; E-mail: julie.wu@gdut.edu.cn。

引用格式: 洪熠豪,温昱曦,赵顺秋,等. 纤维金属层合板准静态侵彻力学行为研究[J]. 机械强度, 2026, 48(7): 120-126.

Hong Yihao, Wen Yuxi, Zhao Shunqiu, et al. Study on quasi-static penetration mechanical behavior of fiber-metal laminates[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(7): 120-126.



免费获取

Abaqus软件进行模拟分析,仿真结果与试验数据吻合。Ma等^[18]对玄武岩织物金属层压板和梯度铝蜂窝夹芯板的爆炸响应进行了试验研究,结果表明,与以铝板为表皮相比,使用玄武岩FML作为面板可以大大提高夹芯板的抗爆性。

在当前防护材料与结构研究的基础上,提出一种新型的凯夫拉/316L纤维钩织结构层合板。该层合板的上、下面板为防弹钢板,芯层以凯夫拉纤维绳、超细软不锈钢纤维绳、混杂纤维钩织而成。采用试验与模拟相结合的方法,研究该纤维金属层合板的准静态抗侵彻力学行为。

1 试样制备与性能

采用短针钩织法将线径为0.5 mm的凯夫拉49和316不锈钢纤维绳制得316L金属纤维钩织层、凯夫拉纤维钩织层以及混杂纤维钩织层,如图1所示。

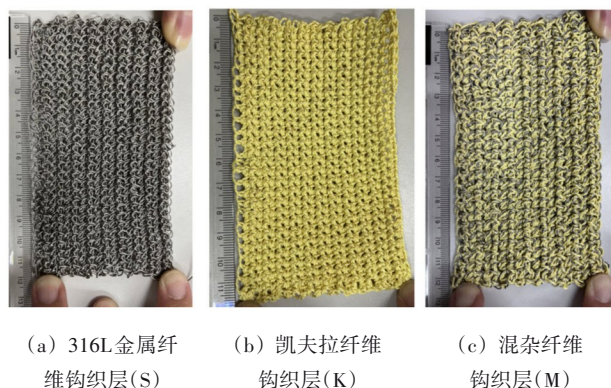


图1 层合板的3种纤维钩织层结构

Fig. 1 Three types of fiber crochet core layers for laminates

利用金属焊接胶(丙烯酸酯)将上述3种不同钩织层与防弹钢板FD79胶接成纤维金属层合板,如图2所示。其中,层合板的防弹钢板分为1.9 mm的面板和1.1 mm的背板。试样尺寸为长150 mm,宽60 mm,类型有PSP、PKP、PSSP、PKKP、PSKP、PMP。其中,P表示面板和背板;S表示316L纤维钩织层;K表示凯夫拉纤维钩织层;M表示混杂纤维钩织层。

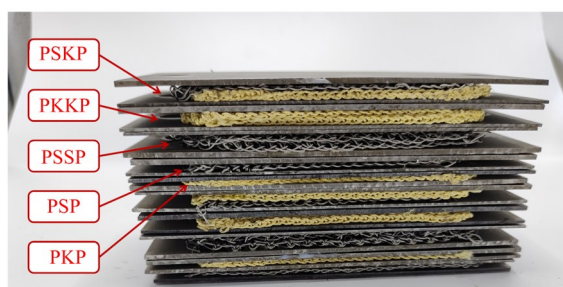


图2 部分纤维金属层合板试样实物

Fig. 2 Physical specimens of partial fiber-metal laminates

本文所涉及的材料为FD79防弹钢、316不锈钢和凯夫拉49^[19],其具体材料属性经试验测定如表1所示。

表1 FD79防弹钢、316不锈钢及凯夫拉49材料基本力学属性
Tab. 1 Mechanical properties of FD79 bulletproof steel, 316 stainless steel, and Kevlar 49

材料	密度 ρ / (g/mm ³)	抗拉强度 R_m / MPa	弹性模量 E / MPa	泊松比
FD79防弹钢	7.86×10^{-3}	1 862	204 000	0.28
316不锈钢	7.93×10^{-3}	515	194 020	0.30
凯夫拉49	1.44×10^{-3}	2 300	124 000	0.35

2 纤维金属层合板的准静态侵彻仿真与试验

2.1 有限元模型

通过SolidWorks软件,建立模拟所用的试件及准静态侵彻平台模型。基于Abaqus软件对其进行准静态侵彻仿真。该层合板的芯层由短针钩织而成,纤维之间相互勾连缠绕结节,结构相对复杂,故需对试件模型进行理想化处理。采用“分型分析”的方法确定芯层的行数和列数,根据截面积等效的方法确定扫描模型的丝径。最终确定金属纤维钩织层和凯夫拉钩织层的扫描直径分别为1.28、1.68 mm,模型理想化所涉及具体的行列数及体积质量等参数如表2所示。

表2 有限元等效模型中纤维钩织层几何与结构参数
Tab. 2 Structural parameters of equivalent models for fiber crochet layers

材料	行数	列数	扫描直径/mm	体积/mm ³	质量/g
316不锈钢	11	26	1.28	3 074.79	24.38
凯夫拉49	13	27	1.68	4 829.56	6.96

在网格划分时,为了兼顾模拟结果的准确性与计算速度,防弹钢板选用六面体单元(C3D8R)。其中,面板网格尺寸为0.95 mm,共23 242个单元;背板网格尺寸为1.1 mm,共7 598个单元。由于模型不规则,芯层选取四面体网格单元(C3D10M)进行划分。其中,316L纤维钩织层网格尺寸为2.0 mm,共58 228个单元;凯夫拉纤维钩织层网格尺寸为2.0 mm,共73 052个单元。模型网格划分如图3所示。

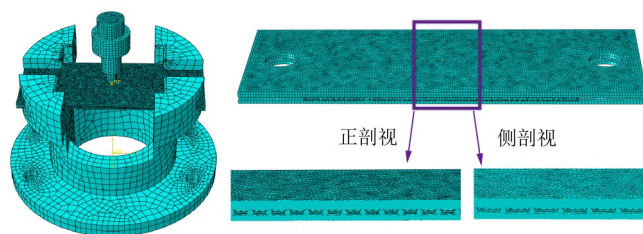


图3 有限元模型及网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the finite element model and the mesh division

2.2 试验平台

对上述矩形纤维金属层合板进行准静态侵彻性能测试,测试设备为日本岛津AGS-X100KN型材料电子万能试验机。试验过程通过上端侵彻压头的位移

加载进行控制,加载速度为 3 mm/min,侵彻压头和试验台如图 4 所示。

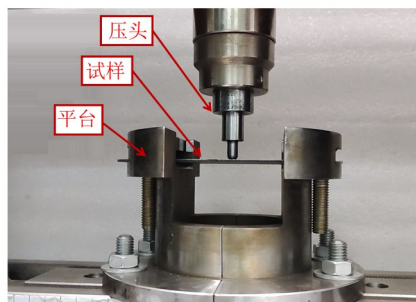


图 4 层合板准静态侵彻试验平台

Fig. 4 Test setup for quasi-static penetration of laminates

2.3 性能评价指标

选取 4 个吸能指标:初始峰值载荷(Initial Peak Force, IPF)、峰值载荷位移(Peak Force Displacement, PFD)、吸能(Energy Absorption, EA)、比吸能(Specific Energy Absorption, SEA),来评价上述 6 种层合板结构的能量吸收特性^[20]。

初始峰值载荷为侵彻过程中产生的第 1 个冲击力峰值,通常出现在弹性阶段之后。IPF 值越低,则初始刚度越低,从而减轻了由于初始冲击的瞬时过载而造成的伤害。

吸能为侵彻过程中结构形变所吸收的能量,可通过对侵彻力和位移进行积分计算得到,计算式为

$$E_A = \int_0^d F(x) dx \quad (1)$$

式中, $F(x)$ 为侵彻力; d 为设定的侵彻位移。

比吸能为单位质量的吸能值,可通过吸能与质量之比得到,计算式为

$$E_{SA} = \frac{E_A}{m} \quad (2)$$

式中, m 为质量。

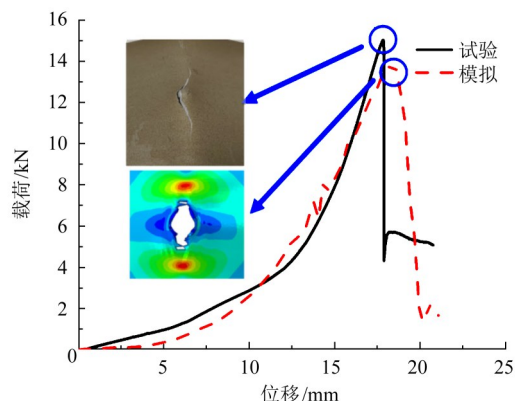
3 结果与分析

3.1 准静态侵彻力学曲线分析

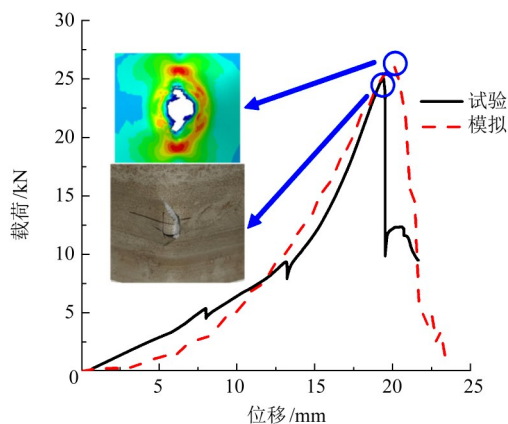
通过将试验载荷-位移曲线与 Abaqus 软件有限元仿真计算输出的模拟曲线进行对比验证,研究该层合板在准静态侵彻工作状态下的力学行为,误差范围控制在 10% 以内。

由图 5(a)可知,面板 P_1 的试验与模拟峰值载荷分别为 15.02、13.86 kN,最大侵彻位移分别为 17.85、18.41 mm。载荷达到峰值时,侵入点发生开裂失效,载荷急剧下降,继续侵入,载荷小幅度上升后缓慢下降。此过程中裂纹以侵入点为起点沿着板的两侧不断扩展,模拟失效云图进一步验证了失效的危险区。由图 5(b)可知,背板 P_2 曲线整体趋势与 P_1 相似,但由于 P_2 比 P_1 厚,故载荷更高、侵入行程也更大。试验与

模拟的峰值载荷分别为 25.06、26.15 kN,最大侵彻位移分别为 19.40、20.08 mm。相较于 P_1 的失效, P_2 裂纹开口更大,但是裂纹长度更短。



(a) P_1 板



(b) P_2 板

图 5 准静态侵彻 P_1 、 P_2 板试验与模拟载荷-位移曲线

Fig. 5 Test and simulated load-displacement curves of P_1 , P_2 plates

图 6(a)为准静态侵彻单层 316L 纤维钩织层的层合板(PSP)试验与模拟的载荷-位移曲线图。由于单层 316L 纤维钩织层 S 的厚度极薄, PSP 层合板在遭受侵彻时的力学响应主要表现为面板 P_1 与背板 P_2 的直接力学叠加,所以 PSP 的峰值载荷 40.60 kN 与 P_1 和 P_2 峰值载荷的数值和 40.08 kN 相似,因此 S 层对侵彻时承载的贡献不大。曲线的整体趋势与单板侵彻时相似,载荷增长速率快,峰值后载荷骤降幅度也大。但载荷在达峰值前出现波动,此为金属纤维钩织芯层被压紧压实,起到一定缓冲作用。此外,由于 S 层的加入, PSP 失效时背板裂纹小。由图 6(b)可知, PKP 的曲线与 PSP 的相似,峰值载荷为 40.62 kN,但侵彻位移比 PSP (26.95 mm) 少 3.51 mm,为 23.44 mm,分析应为 K 层比 S 层更薄且质软更容易被压紧,面板和背板的连接紧密,整体性好,侵彻时应力波的传播快,更快达到材料的最大破坏力从而发生开裂失效。与 PSP 相比, PKP 失效形式为背板明显开裂, K 层的缓冲作用不明显。

图 7(a)为双层 316L 纤维钩织层的曲线图,由图 7(a)可知,与 PSP 相比, PSSP 的峰值载荷为 26.91 kN,下降了 30.6%,侵彻位移为 28.17 mm,增加了 4.5%。

PSSP 达峰值载荷前存在两处明显波动,可知两层 316L 纤维钩织层的缓冲作用明显。两者模拟曲线整体趋势相同,峰值载荷为 30.84 kN,略大于试验结果。PSSP 层合板背面失效形式不同于裂纹扩展,侵入点破裂有穿透的趋势,失效区域更集中。由图 7(b)可知,PKKP 侵入前期与后期载荷的上升趋势有所变化,后期载荷增长速度快,应与凯夫拉纤维钩织层被压实压紧,前、后防弹板共同作用有关。由于凯夫拉纤维具有柔性,与 PSP、PSSP 相比,PKKP 的力学曲线无明显波动。最终 PKKP 的峰值载荷为 39.21 kN,最大侵入位移为 31.39 mm,比 PKP 的载荷低,侵入位移更深,起到了更好的缓冲作用。

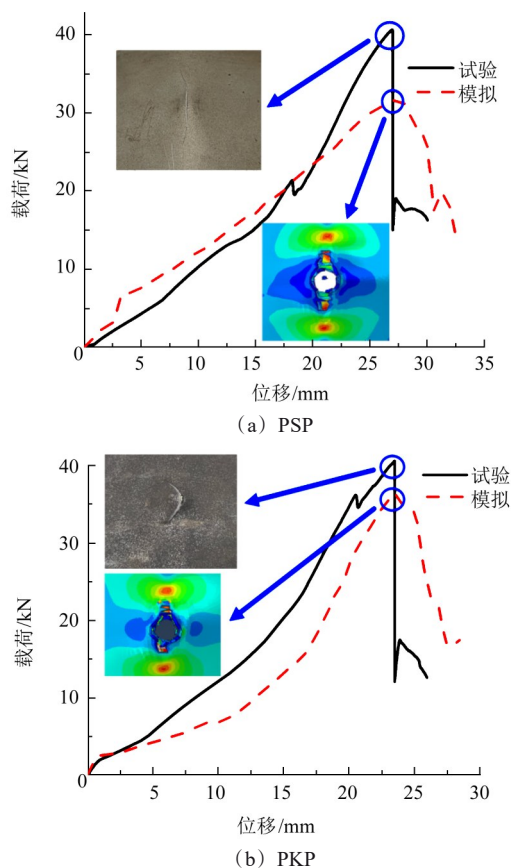


图 6 准静态侵入 PSP、PKP 层合板试验与模拟载荷-位移曲线
Fig. 6 Test and simulated load-displacement curves of PSP, PKP laminates

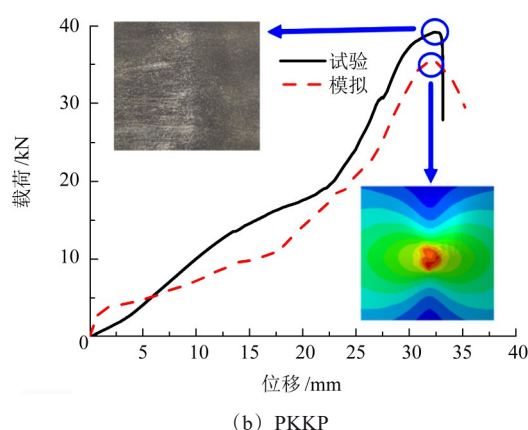
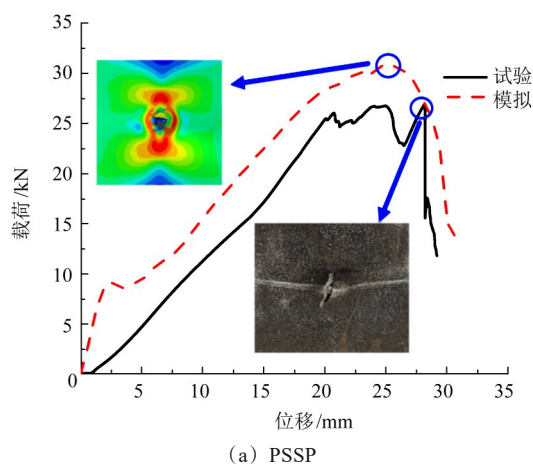


图 7 准静态侵入 PSSP、PKKP 层合板试验与模拟载荷-位移曲线
Fig. 7 Test and simulated load-displacement curves of PSSP/PKPP laminates

准静态侵入 PSKP、PMP 层合板试验与模拟载荷-位移曲线如图 8 所示。

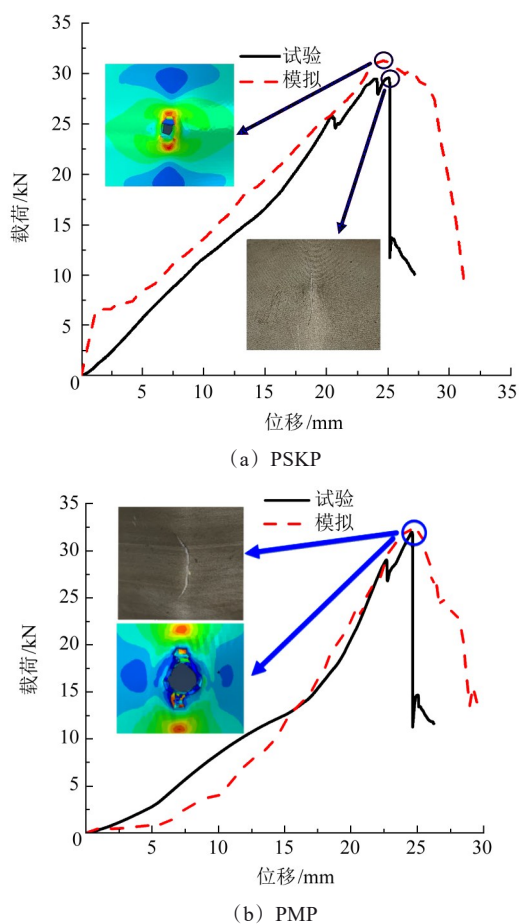


图 8 准静态侵入 PSKP、PMP 层合板试验与模拟载荷-位移曲线
Fig. 8 Test and simulated load-displacement curves of PSKP, PMP laminates

由图 8(a)可知,PSKP 曲线达峰值前存在两处明显的波动,分别位于侵入位移为 20.32、24.18 mm 处,这是钩织层 S 和 K 的缓冲作用。但与 PSSP 相比,由于芯层 SK 中 K 层质软较薄,缓冲效果比较弱,最终峰值载荷为 29.60 kN,侵入失效位移为 25.03 mm。模拟的峰值载荷为 31.14 kN,失效后载荷下降的速率比试验慢。由于有芯层的缓冲,层合板背板仅有一道细微

的裂纹。由图8(b)可知,由于PMP仅有M层,比单层S、K厚且钩织紧密强度高不易被压缩,而M层又比双层芯层薄,所以PMP的缓冲作用是优于PSP、PKP,弱于PSSP、PSKP的。载荷达峰值前有一次波动,应为混合钩织层的缓冲作用,最终峰值载荷为31.96 kN,最大侵彻位移为24.6 mm,背板产生明显裂纹且裂纹扩展。

汇总准静态侵彻纤维金属层合板的载荷-位移曲线,如图9所示。由图9可知,层合板PSP、PKP、PSSP、PKKP、PSKP、PMP的峰值载荷分别为40.60、40.62、26.91、39.21、29.60、31.96 kN,由试验的整体结果可得出以下规律:当层间芯层为单层时,芯层薄,对防弹板的影响较小,层合板的峰值载荷接近于防弹板材料本身的峰值载荷;当芯层具有一定的厚度时,由于芯层能起到缓冲的作用,峰值载荷降低。各层合板的峰值载荷位移分别为26.95、23.44、28.17、31.39、25.03、24.60 mm,芯层的加入降低了防弹板的刚度,比起单层防弹板变形程度增大,更有利于在侵彻过程中吸收耗散更多能量。

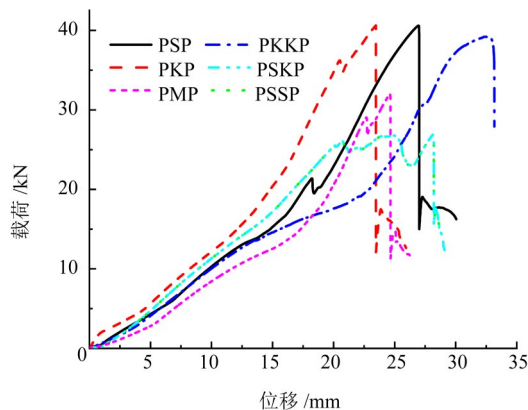


图9 各结构准静态侵彻载荷-位移测试曲线汇总

Fig. 9 Summary of test load-displacement curves for various laminates

3.2 准静态侵彻吸能特性分析

计算面板 P_1 、背板 P_2 及各层合板的4项吸能特性评价参数,如表3所示。由表3可知,由于芯层的加入,与 P_1 、 P_2 数值之和(40.08 kN)相比,单层芯层的PSP、PKP层合板的峰值载荷分别提高了0.52、0.54 kN,具有双层或混合芯层的PSSP、PKKP、PSKP、PMP层合板的峰值载荷则分别下降了13.17、0.87、10.48、8.12 kN。表明当芯层仅为单层时,缓冲作用不明显,芯层抗侵彻力的加入反而使得峰值载荷大于 P_1 、 P_2 板数值之和。但当芯层为双层或混合钩织层时,芯层起到缓冲作用能够降低侵彻时的峰值。

由于芯层的缓冲作用,层合板的峰值载荷降低,抗侵彻位移增大,各层合板的吸能量分别为435.77、404.06、436.82、565.1、370.61、291.90 J,比 P_1 、 P_2 板的吸能量之和(223.3 J)分别提高95.12%、80.93%、

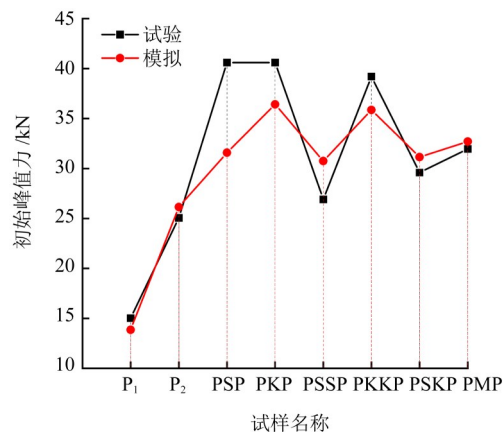
95.59%、153.2%、65.95%、30.70%,其中吸能最高的为PSSP,芯层的加入对层合板吸能性能有着显著的提升。吸能量增大,而芯层质轻,故比吸能分别为1.86、1.75、1.62、2.45、1.52、1.19 J/g,与单板相比也有所提高。

表3 各层合板结构准静态侵彻吸能特性评价参数

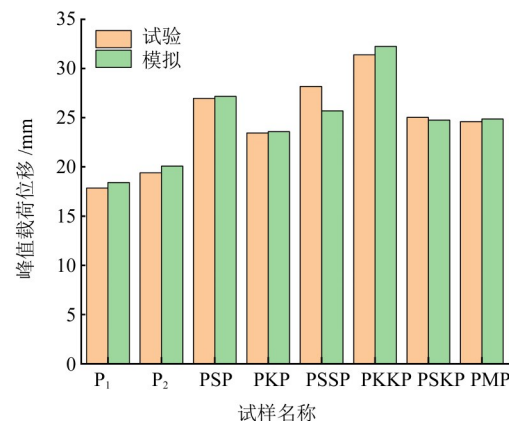
Tab. 3 Evaluated energy absorption parameters of fiber-metal laminates under quasi-static penetration

试样	样品质量/g	初始峰值 载荷/kN	峰值载荷 位移/mm	吸能/J	比吸能/ (J/g)
P_1	88.6	15.02	17.85	68.28	0.77
P_2	128.6	25.06	19.40	155.05	1.21
PSP	234.2	40.60	26.95	435.77	1.86
PKP	230.4	40.62	23.44	404.06	1.75
PSSP	270.4	26.91	28.17	436.82	1.62
PKKP	231.0	39.21	31.39	565.10	2.45
PSKP	244.0	29.60	25.03	370.61	1.52
PMP	245.2	31.96	24.60	291.90	1.19

图10为 P_1 、 P_2 单板与PSP、PKP、PSSP、PKKP、PSKP、PMP这6种结构在准静态侵彻测试与仿真模拟的4项吸能评价参数对比图。由图10可知,双层凯夫拉纤维钩织层PKKP的模拟与试验结果相差较大,应与模拟侵彻双层凯夫拉纤维金属层合板时的层间接触、摩擦设置有关。其余层合板的模拟与试验结果较一致,说明有限元分析的可靠性。



(a) 初始峰值力



(b) 峰值载荷位移

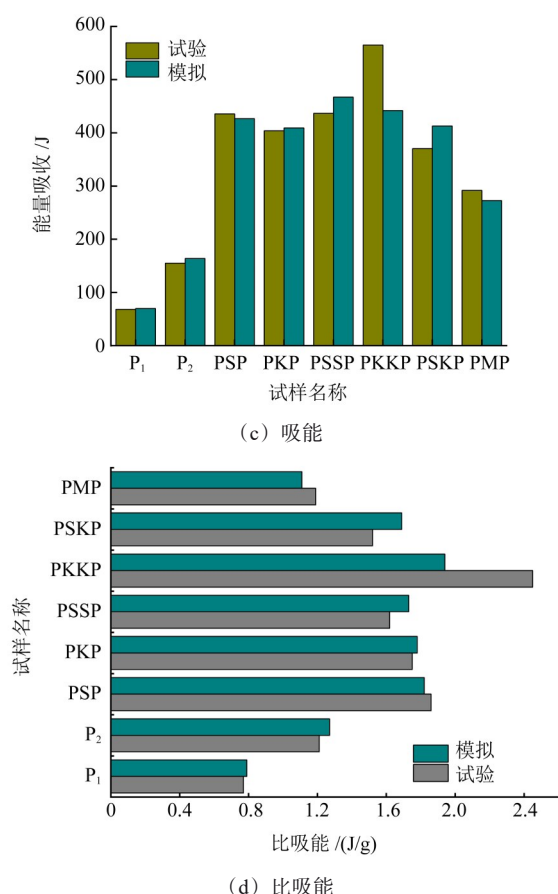


图 10 P₁、P₂单板与 6 种层合板结构试验与模拟吸能评价参数对比

Fig. 10 Comparison of test and simulated energy absorption parameters for six laminated panel structures and P₁, P₂ single plates

4 结论

通过试验载荷-位移曲线与 Abaqus 软件仿真模拟计算输出的载荷-位移曲线进行对比,研究纤维金属层合板在准静态侵彻工作状态下的力学行为和吸能特性,得出以下主要结论:

1) 当层间芯层为单层时,层合板的峰值载荷接近于防弹板材料本身的峰值载荷;当芯层具有一定的厚度时,峰值载荷降低。

2) PSP、PKP、PSSP、PKKP、PSKP、PMP 各层合板峰值载荷分别为 40.60、40.62、26.91、39.21、29.60、31.96 kN,与 P₁、P₂ 数值之和(40.08 kN)相比,单层芯层的 PSP、PKP 层合板的峰值载荷分别提高了 0.52、0.54 kN,而具有双层或混合芯层的 PSSP、PKKP、PSKP、PMP 层合板的峰值载荷则分别下降了 13.17、0.87、10.48、8.12 kN。这表明当芯层仅为单层时,其缓冲作用不明显,芯层的加入反而使得峰值载荷大于 P₁、P₂ 板数值之和。然而,当采用双层或混合钩织结构作为芯层时,能够有效降低侵彻过程中的峰值载荷并增加抗侵彻位移。

3) PSP、PKP、PSSP、PKKP、PSKP、PMP 各层合板的吸能量分别为 435.77、404.06、436.82、565.1、

370.61、291.90 J,比 P₁、P₂ 板的吸能量之和(223.3 J)分别提高 95.12%、80.93%、95.59%、153.2%、65.95%、30.70%,芯层的加入对夹芯板吸能性能有着显著的提升。

参考文献 (References)

- [1] 张如灏,崔岸,陈宠,等. 亚麻-玄武岩纤维层合板低速冲击性能及应用研究[J]. 机械强度,2022,44(6):1350-1356.
Zhang Ruhao, Cui An, Chen Chong, et al. Low speed impact performance and application of flax-basalt fiber composites[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(6): 1350-1356. (In Chinese)
- [2] Chen Y Z, Wang Y C, Wang H. Research progress on interlaminar failure behavior of fiber metal laminates[J]. Advances in Polymer Technology, 2020, 2020(1): 3097839.
- [3] 余芬,崔乃威,何振鹏,等. 碳纤维复合材料层合板钻削后拉伸剩余强度研究[J]. 机械强度,2024,46(3):588-594.
Yu Fen, Cui Naiwei, He Zhenpeng, et al. Study on residual tensile strength of carbon fiber composite laminates after drilling[J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(3): 588-594. (In Chinese)
- [4] 刘杜浩,常斌,乔景龙,等. FRP 层合板抗冲击能力与损伤面积的经验估计法[J]. 南京航空航天大学学报,2023,55(4):693-701.
Liu Duhao, Chang Bin, Qiao Jinglong, et al. An empirical estimation method for impact resistance and damage area of FRP laminates[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(4): 693-701. (In Chinese)
- [5] 黄哲峰,李力,杨增钦,等. 双模量复合材料层合结构承载极限的预测[J]. 机械强度,2019,41(6):1445-1453.
Huang Zhefeng, Li Li, Yang Zengqin, et al. Prediction of load limit of bi-modulus composites laminated structure[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(6): 1445-1453. (In Chinese)
- [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] 石益建. 轻质陶瓷纤维复合防弹结构设计研究[D]. 南京:南京理工大学,2020:27-34.
Shi Yijian. Design and research of lightweight ceramic fiber composite bulletproof structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020: 27-34. (In Chinese)
- [8] 秦溶蔓. UHMWPE 混杂结构防弹复合材料制备及应用关键技术研究[D]. 济南:山东大学,2021:43-125.
Qin Rongman. Study on key technologies of preparation and application of UHMWPE hybrid bulletproof composites[D]. Jinan: Shandong University, 2021: 43-125. (In Chinese)
- [9] 凌天鹏. 超高分子量聚乙烯硬质靶板弹道响应研究[D]. 郑州:中原工学院,2021:31-47.
Ling Tianpeng. Ballistic response study of ultra-high molecular weight polyethylene rigid panel[D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2021: 31-47. (In Chinese)

- [10] 皮骏,崔红利,贾元琨. 碳-芳纶纤维复合材料高速冲击响应数值模拟[J]. 机械强度,2024,46(2):416-423.
Pi Jun, Cui Hongli, Jia Yuankun. Numerical simulation of high-speed impact response of carbon aramid fiber composites[J]. Journal of Mechanical Strength,2024,46(2):416-423. (In Chinese)
- [11] Liu C J, Zhang Y X, Ye L. High velocity impact responses of sandwich panels with metal fibre laminate skins and aluminium foam core[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 100: 139-153.
- [12] Abdullah MR, Cantwell W J. The impact resistance of polypropylene-based fibre-metal laminates[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(11/12): 1682-1693.
- [13] Sharma A P, Velmurugan R, Shankar K, et al. High-velocity impact response of titanium-based fiber metal laminates. Part II : analytical modeling [J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 152: 103853.
- [14] Santiago R, Cantwell W, Alves M. Impact on thermoplastic fibre-metal laminates: experimental observations [J]. Composite Structures, 2017, 159: 800-817.
- [15] Lemanski S L, Nurick G N, Langdon G S, et al. Behaviour of fibre metal laminates subjected to localised blast loading: Part II : quantitative analysis [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(7): 1223-1245.
- [16] Langdon G S, Lemanski S L, Nurick G N, et al. Behaviour of fibre-metal laminates subjected to localised blast loading: part I: Experimental observations [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(7): 1202-1222.
- [17] Xu M C, Yang Y Z, Lei H S, et al. Dynamic response of fiber metal laminates subjected to localized high impulse blast loading [J]. Composite Structures, 2020, 243: 112216.
- [18] Ma X M, Li X, Li S Q, et al. Blast response of gradient honeycomb sandwich panels with basalt fiber metal laminates as skins [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 123: 126-139.
- [19] 张晓彤. Kevlar纤维增强复合材料多尺度力学行为及层间剪切性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2016:11-28.
Zhang Xiaotong. Research on the multi-scale mechanical behavior and interlaminar shear performance of Kevlar fabric reinforced composites[D]. Changsha:Hunan University,2016:11-28. (In Chinese)
- [20] 陈雅婷,洪熠豪,吴俊,等. 仿生多胞薄壁结构冲击吸能特性研究[J]. 机械强度,2024,46(3):750-755.
Chen Yating, Hong Yihao, Wu Jun, et al. Study on impact energy absorption characteristics of biomimetic multi-cell thin-walled structure[J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(3): 750-755. (In Chinese)

Study on quasi-static penetration mechanical behavior of fiber-metal laminates

HONG Yihao^{1,2} WEN Yuxi¹ ZHAO Shunqiu¹ HAN Jianlin¹ WU Fei^{1,2}

(1. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

(2. Guangdong Provincial Laboratory of Chemistry and Fine Chemical Engineering Jieyang Center, Jieyang 522000, China)

Abstract: [Objective] To address the challenge of single materials struggling to simultaneously satisfy anti-penetration performance and lightweight design requirements, the quasi-static penetration mechanical behavior and energy absorption characteristics of fiber-metal laminates with crochet core structures were investigated. [Methods] Firstly, laminate samples featuring different fiber crochet core layers were fabricated using short-needle crocheting and bonding methods, followed by quasi-static penetration tests on an electronic universal testing machine. Then, equivalent idealized numerical models were established using SolidWorks and imported into Abaqus finite element analysis software for simulations, with evaluation metrics introduced to process the test and numerical data. [Results] The numerical simulation results exhibit excellent agreement with the test curves. Single-layer cores exert a negligible effect on the peak load of the laminates, whereas double-layer or hybrid crochet structures display a pronounced buffering effect. Compared with the reference un-cored plates (40.08 kN), the peak loads of PSP and PKP laminates increase by 0.52 kN and 0.54 kN, while those of PSSP, PKKP, PSKP, and PMP laminates decrease by 13.17, 0.87, 10.48, and 8.12 kN, respectively. Due to reduced stiffness and expanded deformation, their energy absorption capacities significantly increase by 95.12%, 80.93%, 95.59%, 153.2%, 65.95%, and 30.70%, respectively, with the double-layer stainless steel crochet laminate (PSSP) demonstrating the optimal energy dissipation capability.

Key words: Crochet structure; Finite element simulation; Laminate; Penetration resistance; Light weight

Corresponding author: WU Fei, E-mail: julie.wu@gdut.edu.cn

Fund: National Natural Science Foundation of China (52175294, 51705085); Innovation Research Project of Education Bureau of Foshan City (2023XJZZ02); Jieyang Branch Laboratory of Chemistry and Fine Chemicals of Guangdong Province (RJDT240027)

Received: 2024-11-11 Revised: 2024-12-03

(编辑:李立)