



梯形波纹铝板填充陶瓷棒复合结构抗侵彻特性研究

魏小凯^{1,2}, 祖旭东^{1*}, 黄正祥¹, 黄灿灿³, 王瑞聪¹, 李学岭⁴, 张 涛¹

(1.南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094;2.中国五洲工程设计集团有限公司,北京 100053;
3.九江国科远大机电有限公司,江西 九江 332100;4.安徽方圆机电股份有限公司,安徽 蚌埠 233000)

摘要:为研究波纹铝板填充陶瓷棒复合结构不同位置的抗侵彻性能,设计了一种由梯形波纹铝板填充多根陶瓷棒组成的复合结构,开展弹道冲击试验和数值仿真,对比分析不同弹着点处的失效模式、吸能效率和速度变化规律,得到该型结构 3 个典型位置的抗侵彻机理。结果表明:陶瓷面板的破碎耗能、梯形波纹铝板的剪切扩孔和塑性变形、多根陶瓷棒的断裂破碎以及 PE 背板的拉伸破坏,构成梯形波纹铝板填充陶瓷棒复合结构的吸能情况。复合结构的抗弹能力与弹着点以及背板的支撑能力有关。复合结构中,梯形上下底边中点相较于斜边中点,陶瓷棒的防护区域大,陶瓷破碎面积大,抗侵彻能力更强。在弹体高速侵彻靶板的过程中,由于陶瓷棒后铝板和 PE 背板的共同约束,下底边中点相较于上底边,陶瓷破碎更加彻底,抗侵彻能力有一定的提高,弹道极限速度对比其他两处分别提升了 20.45%和 8.14%。研究结果为波纹填充结构的设计提供参考。

关键词:铝制波纹板;陶瓷棒;弹着点;抗侵彻特性

中图分类号:TJ012.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-499X(2025)02-0031-08

Study on the Penetration Resistance of Trapezoidal Corrugated Aluminum Plate Filled with Ceramic Rod Composite Structure

WEI Xiaokai^{1,2}, ZU Xudong^{1*}, HUANG Zhengxiang¹, HUANG Cancan³,
WANG Ruicong¹, LI Xueling⁴, ZHANG Tao¹

(1.School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2.China Wuzhou Engineering Group Co. Ltd., Beijing 100053, China;

3.Jiujiang Guoke Yuanda Electromechanical Co. Ltd., Jiujiang 332100, China;

4.Anhui Fangyuan Electromechanical Co. Ltd., Bengbu 233000, China)

Abstract: In order to study the penetration resistance of the corrugated aluminum plate filled with ceramic rod composite structure under different impact positions, a multi-ceramic-rod reinforced composite structure composed of trapezoidal corrugated aluminum plate was designed, followed by ballistic impact test and numerical simulation. By comparing the failure mode, energy absorption efficiency and velocity variation patterns under different impact points, the anti-penetration mechanism of the structure at three typical positions was obtained. The results show that the energy absorption of the multi-ceramic-rod reinforced trapezoidal corrugated aluminum plate is composed of the crushing energy dissipation of the ceramic panel, the shear expansion and plastic deformation of the trapezoidal corrugated aluminum plate, the fracture and crushing of multiple ceramic rods, and the tensile failure of the PE backplate. The ballistic resistance exhibits significant position-dependent characteristics, particularly influenced by

ceramic rod spatial distribution and backplate support capacity. In composite structures, compared the midpoints of the upper and lower bases of the trapezoid with the midpoint of the oblique side, the protective area of the ceramic rod is larger, the ceramic crushing area is larger, and the anti-penetration ability is stronger. During high-velocity penetration of the target plate, due to the common constraints of the aluminum plate and the PE backplate behind the ceramic rod, the ceramic fragmentation near the midpoint of the lower base is more thorough compared to the upper base, leading to a further improvement in anti-penetration performance. The anti-penetration ability is improved, resulting in 20.45% and 8.14% increases in ballistic limit velocity compared with the other two places. The research results provide a theoretical guidance for the design of the reinforced corrugated structure.

Key words: aluminum corrugated sheet; ceramic rods; impact point; anti-penetration properties

随着材料制备技术和机械加工工艺的成熟,轻质多孔结构得到迅速发展,其具有良好的结构效应和力学性能,在抗爆炸冲击以及抗侵彻方面受到广泛的应用。波纹结构作为典型的轻质多孔结构,制造加工简便、力学性能优秀,在受到冲击后易发生变形等损伤,进而吸收更多的能量,因此广泛应用在航空航天、舰船结构等防护领域。

波纹结构多采用三明治夹层结构,由面板、背板和中间芯体层组成,可通过调整面板、背板以及芯层的材料组合提高整体结构性能。同时,在波纹结构的孔隙中填充不同的材料,可以改善整体结构的抗冲击能力^[1]。因此,夹层结构的设计以及填充材料的选择是大幅提升防弹插板防护性能的有效途径。

骆伟^[2]对由碳纤维面板以及铝合金波纹芯层制备三明治结构的不同位置进行落锤冲击试验,得到长边顶点处抗冲击抵抗能力更强的结论。许俊祥^[3]研究了金属波纹芯层不同角度、不同位置处的抗侵彻能力,认为倾角为 60° 、波纹两顶点之间抗侵彻能力最优。夏鸿雁等^[4]在三角形波纹板孔洞中填充混凝土,验证了混凝土材料的不适用性。郭锐等^[5]通过弹丸试验证实了添加混杂短切玻璃纤维环氧树脂和陶瓷棒的金字塔型点阵金属结构可提高抗弹能力。YUNGWIRTH等^[6]在金字塔型点阵结构中填充聚氨酯和氧化铝陶瓷,并在面背板与夹层间增加凯夫拉纤维层,结果表明陶瓷的抗侵彻增益效果远大于聚氨酯,同时凯夫拉并没有起到很好的抗侵彻增益效果。NI等^[7]对比了金字塔型点阵结构在无填充、填充陶瓷棱柱以及填充环氧树脂和陶瓷的3种情况下的抗冲击响应,认为填充环氧树脂和陶瓷棱柱的点阵结构具有更优越的抗侵彻性能。

WADLEY等^[8]对填充了氧化铝陶瓷的三角形铝合金波纹板开展了抗侵彻研究,对比等面密度均质铝合金板,其弹道极限速度提高近100 m/s。MASTA等^[9]在文献[8]的基础上进一步引入高分子量聚乙烯 (ultra-high molecular weight polyethylene, UHMWPE),将其包覆在填充波纹夹芯结构表面,提高了波纹结构的弹道极限速度。LIU等^[10]利用圆弧形凸台陶瓷柱和背板Ti6Al4V、UHMWPE、碳纤维板和铝合金7075-T6搭配备备了3种不同的复合靶板,分析了不同的冲击工况。TOMOHIRO等^[11-12]根据波纹夹层结构沿波纹方向可变形的特点,制备了变形可控的波纹夹层尾翼结构,并进行风洞试验和有限元模拟,给出了波纹结构刚度的简化解析模型。

本文设计了梯形波纹铝板填充陶瓷棒复合结构(以下简称复合结构),以陶瓷作为面板,UHMWPE作为背板,铝制梯形波纹板作为芯层。为提高轻质多孔结构薄弱位置的防护能力,降低一定的面密度,在梯形波纹铝板的空隙中填充多根陶瓷棒,并利用室温硫化硅橡胶进行注塑密封,最后采用环氧树脂将梯形波纹铝板与面板和背板粘接。为研究其不同部位的抗侵彻能力,进行7.62 mm穿甲弹侵彻的弹道冲击试验,并开展有限元数值仿真,分析各部件的破碎吸能机理。

1 弹道侵彻试验

1.1 试验概况

试验用弹丸为7.62 mm穿甲弹,结构如图1所示。弹头主要由铜制被甲、铅套和钢芯组成,长约32.3 mm,直径约为7.92 mm,总体质量约为10 g,钢芯材料为T12A钢,质量约为5 g,射速范围为830~880 m/s。

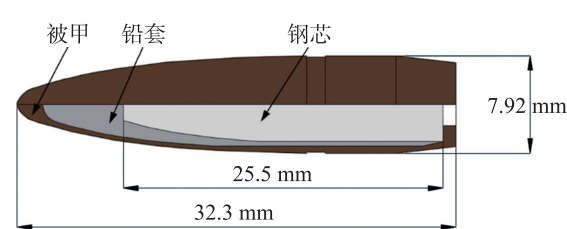


图1 弹体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the projectile

图2为所设计的复合结构的示意图。复合结构波纹芯层形状为梯形,梯形斜边倾斜角度为 60° ;面板及填充物的材料为氧化铝陶瓷,其具有极高的硬度和紧凑的晶体结构及相对低廉的价格^[13-14],氧化铝陶瓷面板厚度为4 mm。梯形波纹铝板孔隙中的

陶瓷棒直径为4 mm,填充的硫化硅橡胶起固定作用,防止结构晃动。UHMWPE背板厚度为4 mm,对复合结构提供支撑作用,可避免陶瓷碎片的飞溅。不同层间采用环氧树脂粘结,减少高速弹丸侵彻下层间出现的严重分层。

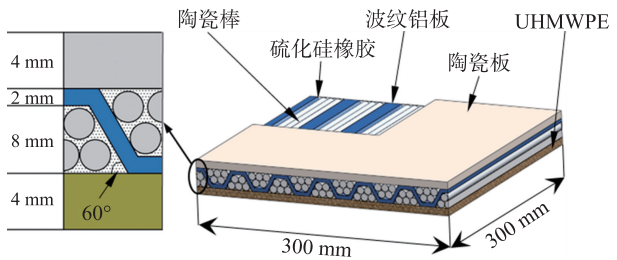


图2 复合结构总体示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the composite structure

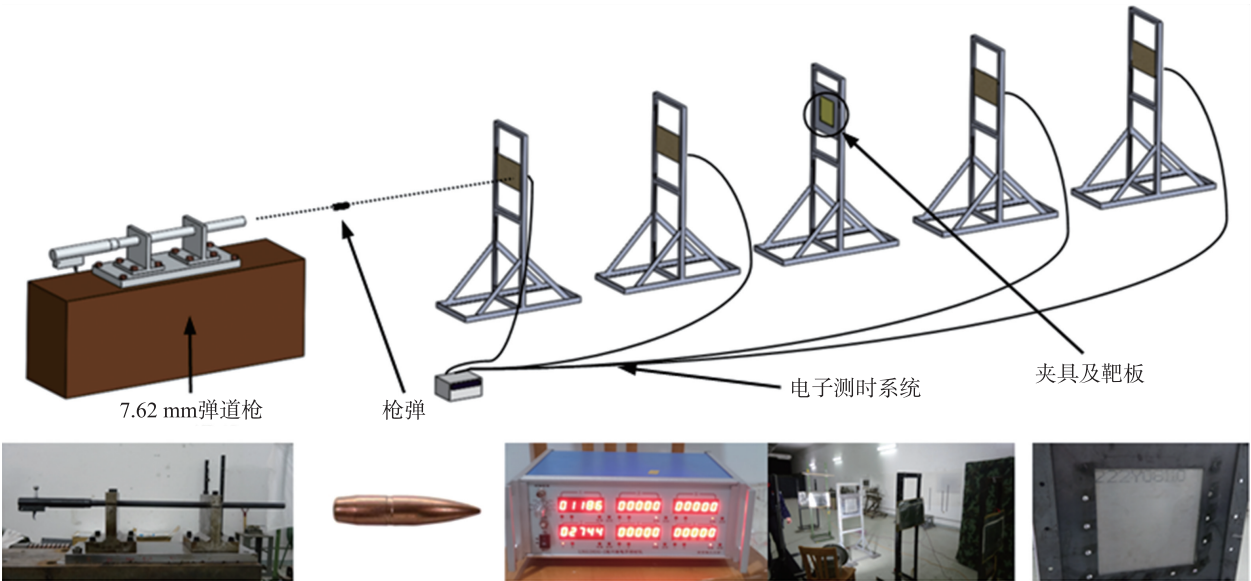


图3 试验现场布置图

Fig. 3 Layout of the test site

试验现场整体布置如图3所示,试验中弹丸出枪口距离靶板迎弹面3 m左右。试验中利用电子测时系统得到弹丸的侵彻靶板前的着靶速度和穿靶后的剩余速度,试验后观察靶板的毁伤情况。由于复合结构属于非均质结构,不同弹着点处靶板的防护效果不同,选取典型的3个位置分别定义为位置1、2和3进行试验,具体位置示意图4。

1.2 试验结果分析

试验中对第1块靶板进行了双发试验,对后续的3块靶板进行单发试验,依次编号为#1—#5,试验工况和结果如表1所示。本次试验共得到4组有效数据,对比可以看出3个着靶位置处的实验结果存在一定差异。

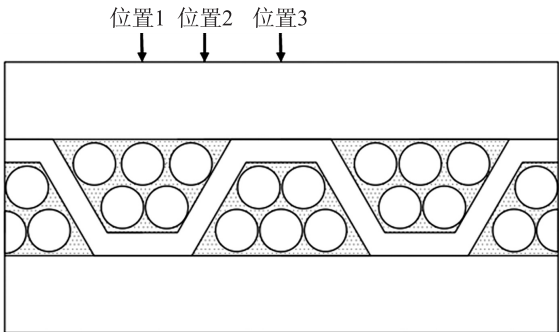


图4 弹着点位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the location of the impact point

表 1 试验结果

Table 1 Results of the ballistic test

编号	弹着点	着靶速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	剩余速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
#1	位置 3	836.12	446.42
#2	位置 3	846.86	567.86
#3	位置 2	/	641.44
#4	位置 2	882.61	646.00
#5	位置 1	877.96	496.29

试验后靶板的毁伤情况见图 5。由图可知,陶瓷面板作为迎弹面,在侵彻过程中发生碎裂、飞溅,形成陶瓷锥吸收弹丸动能。弹丸侵彻陶瓷面板时,会在接触表面产生强压缩波,并呈球状向陶瓷周向及内部传播。当压缩波传至陶瓷面板与波纹芯层界面时,陶瓷与波纹芯层界面会产生反射波。当反射波(即拉伸波)的强度达到拉伸断裂极限时,陶瓷内部会发生断裂失效,从弹丸侵彻中心向四周产生多条径向裂纹^[15-16]。UHMWPE 板主要通过纤维的拉伸、断裂产生大变形来吸收弹丸的剩余能量。背板受到弹丸冲击力的影响,从靶板上完全撕裂脱落,其主要的破坏形式为分层、拉伸断裂及鼓包变形等。拉伸变形从侵彻中心向四周延伸呈十字形,同时侵彻位置发生碳化的现象。陶瓷面板与 UHMWPE 背板不同弹着点的损伤情况大致相同;铝板强度低、韧性高,主要发生剪切扩孔和塑性变形,破坏形式为花瓣形扩孔。试验后,位置 1 和位置 3 处的铝板背弹面变形扩孔面积相当,位置 3 处扩孔接近圆形,位置 1 处的破孔边缘有一定的撕裂脱落,位置 2 的扩孔最大,呈不规则状。

陶瓷棒在侵彻中心完全粉碎,靠近作用区的部分发生不同程度的断裂损伤。试验后,多根陶瓷棒的损伤情况较为复杂,陶瓷棒碎片难以回收分类,其破碎耗能的情况很难通过宏观现象进行量化分析。因此,需借助数值仿真分析陶瓷棒的耗能情况,得到

复合结构不同位置处的抗侵彻特性。

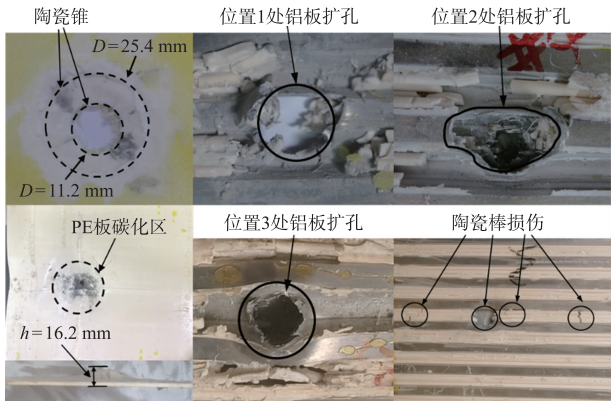


图 5 试验毁伤结果

Fig. 5 Damage results of the tested target

2 弹丸侵彻靶板数值模拟

2.1 计算模型

仿真的弹丸和复合靶板的结构参数与试验参数保持一致。当弹丸侵彻靶板时,作用于靶板的主要部分为钢芯,数值仿真中可将弹丸简化为钢芯,网格尺寸为 0.15 mm,模型均采用 8 节点 6 面体单元。复合结构中硫化硅橡胶主要起固定陶瓷棒的作用,对复合结构的防护能力影响较小。为节省计算时间,通过对陶瓷棒设置边界约束代替硫化硅橡胶,同时利用模型的对称性,弹着点为位置 1 和位置 3 处工况的仿真模型选用 1/4 模型,位置 2 处工况的仿真模型选用 1/2 模型。为保证计算精度,采用渐变式网格,对弹丸侵彻有直接影响的部分进行网格加密,靶板长度选择 150 mm,减少边界效应对侵彻结果的影响。板间的粘结关系通过 CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK 固连接触^[17],弹丸与靶板之间采用 CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE 侵蚀接触^[18],弹丸入射速度为 830 m/s,其侵彻复合结构模型如图 6 所示。

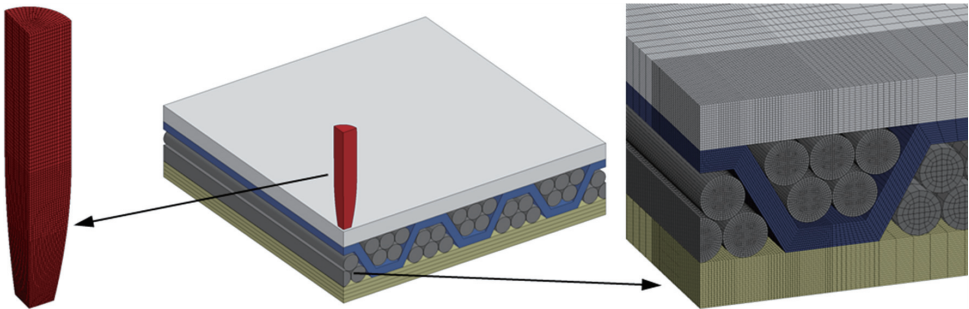


图 6 模型建立与网格划分

Fig. 6 Model building and meshing

2.2 材料参数

钢芯与铝板均分别采用 Johnson-Cook^[19] 本构模型和 Genius 状态方程描述金属材料破坏准则,参数如表 2 所示,其中 A 、 B 、 C 、 M 、 N 为待定的材料参数。陶瓷采用 Johnson _ Holmquist _ Ceramics 材料模型^[20],该模型适用于描述脆性材料的破坏损伤形式,具体参数如表 3 所示,表中 G 为剪切模量, K_1 为初始体积模量, K_2 、 K_3 为高阶拟合参数^[14]。定义陶瓷材料的等效应力为

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_j^*) \tag{1}$$

式中: D 是损伤变量,用来描述材料的损伤程度。其中 D 为 1 表明材料完全破坏,为 0 表明材料没有损伤。 σ_i^* 描述陶瓷未损伤时的初始强度, σ_j^* 表示陶瓷破碎时的断裂强度。

应力与应变在模型假设初始状态下和破碎完全的状态下的关系式为

$$\sigma_i^* = a(P + P_0)^n (1 + \ln \dot{\epsilon}^*) \tag{2}$$

$$\sigma_j^* = bP^m (1 + \ln \dot{\epsilon}^*) \tag{3}$$

式中: P_0 为静水压力, P 为材料所受的压力, a 、 b 、 c 、 n 、 m 为材料常数, $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲材料应变率。UHMWPE 层复合板采用 * MAT _ COMPOSITE _ DAMAGE 材料模型进行描述,具体材料参数如 4 所示,表中 E_x 、 E_y 、 E_z 分别为 3 个正交方向上的弹性模量。

表 2 钢芯及铝板材料参数

Table 2 Material parameters of steel core and aluminum plate

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	A/MPa	B/MPa	N	C	M
钢芯	7.85	1540	477	0.16	0	1.0
铝	2.77	1670	596	0.55	0.01	1.0

表 3 陶瓷材料的 JH-2 模型参数

Table 3 JH-2 model parameters for ceramic materials

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	G/GPa	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa
3.70	152	231	0	0

表 4 UHMWPE 材料参数

Table 4 Material parameters of UHMWPE

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E_x/GPa	E_y/GPa	E_z/GPa
0.98	30.7	30.7	1.97

2.3 数值仿真结果与讨论

试验中采用钢质弹体,且弹丸完全贯穿靶板时,忽略靶板内能吸收的影响^[21]。弹道极限速度的计

算公式参考防护结构总吸能计算公式:

$$E_m = \frac{1}{2}mv_i^2 - \frac{1}{2}mv_r^2 \tag{4}$$

式中: E_m 为总吸能, m 为弹丸质量, v_i 为弹丸的靶前速度, v_r 为剩余速度。假设弹丸在最理想的情况下,即没有任何损耗和阻力的影响,其弹道极限速度 v_m 参考公式可得:

$$E_m = \frac{1}{2}mv_m^2 \tag{5}$$

$$v_m = \sqrt{v_i^2 - v_r^2} \tag{6}$$

由于#3 号弹丸入射速度未测得,#1 号弹丸与#2 号弹丸弹着点虽相同,但#1 号试验后,降低了复合结构抵抗#2 号弹丸的能力,因此选用#1 号弹丸作为位置 3 处的试验结果。试验中得到的位置 1、位置 2 与位置 3 处弹道极限速度分别为 724.24 m/s、601.41 m/s 和 669.72 m/s;数值仿真结果分别为 692.85 m/s、607.55 m/s 和 679.24 m/s,与试验结果相比误差分别为 4.33%、1.02% 和 1.42%,误差均小于 5%。由此可知,数值仿真结果能够准确再现实验结果。相比位置 2 与位置 3,位置 1 处弹道极限速度分别提升了 20.45% 和 8.14%。

弹丸在侵彻陶瓷面板过程中发生墩粗,接触面积增加,其侵彻的大部分陶瓷棒均发生完全断裂。因此,多根陶瓷棒的毁伤过程可用弹丸直接作用的陶瓷棒来代替。通过对比收集的陶瓷棒试验碎片同仿真结果可以看出,陶瓷棒在被弹丸侵彻过程中产生了不同形式的损伤。靠近弹丸附近的陶瓷棒由于直接承受弹丸的冲击力,发生压垮、碎裂等,损伤后的界面是一个不规则的凹凸面。仿真获得的陶瓷棒横截面损伤云图如图 7 所示。可以看出,在陶瓷主要损伤区域仍然呈现锥形破坏趋势。但由于陶瓷棒圆柱形边界的限制,在平行于弹丸入射方向的径向平面,裂纹的扩展遇到边界区域后截断,使得整体出现“Z”字形的断裂损伤。且陶瓷棒可类比为圆柱梁,弹丸侵彻过程可以简化为圆杆与圆柱梁的横向冲击问题。陶瓷棒在中心处受到冲击载荷,产生剪切应力和弯矩,陶瓷属于脆性材料,其结晶结构具有强大的原子键连接,使得其在接近冲击位置的加载下发生纵向拉伸型断裂,断裂口接近 90°。在距离冲击位置较远的部位介于脆性断裂和剪切型断裂之间,断裂面会介于 90°和 45°之间,最终的毁伤情况对比如图 8 所示。

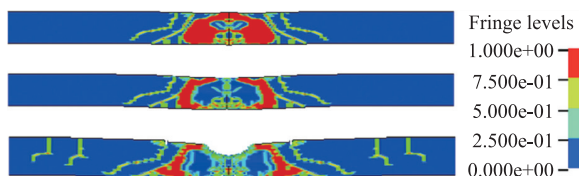


图7 陶瓷棒横截面损伤云图

Fig. 8 Cross-sectional damage contour of a ceramic rod

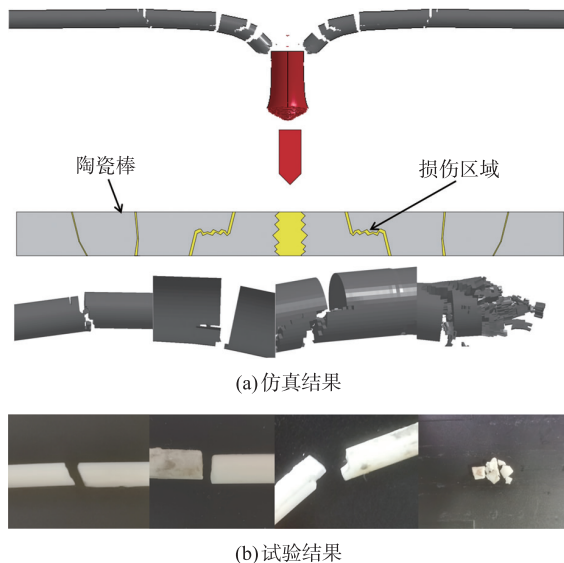
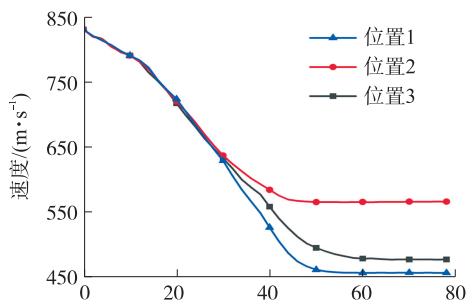
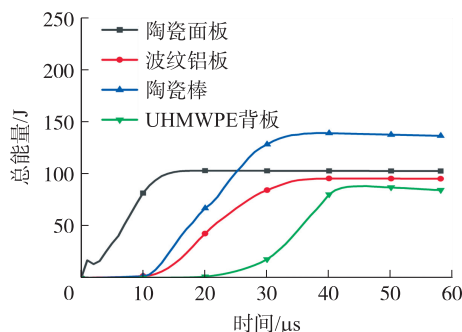


图8 陶瓷棒破坏形式仿真与试验结果图

Fig. 8 Simulation and test result of failure form of ceramic rod



(a) 弹丸仿真剩余速度时程曲线图



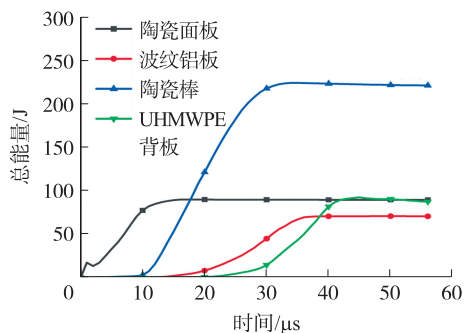
(c) 位置2处各子结构吸能

3 抗侵彻性能分析

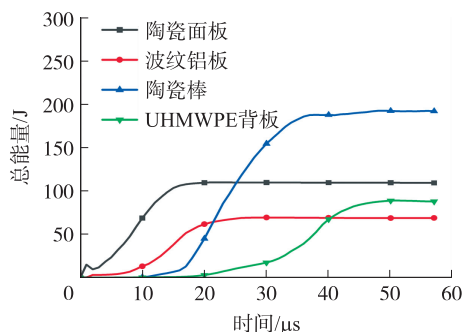
入射速度为 830 m/s 时, 面板不同位置处的时程变化及各子结构吸能量如图 9 所示。

选用剩余速度作为衡量结构抗穿甲弹侵彻性能指标。图 9(a) 为数值仿真中弹丸侵彻复合结构的速度时程变化曲线, 可以看出侵彻过程中弹丸速度并非线性下降过程。在初始阶段, 3 个工况下的弹丸速度变化曲线几乎相同; 28 μs 后, 不同着靶位置的弹丸速度开始出现明显的差距; 在约 42 μs 时, 位置 2 处的弹丸最先贯穿复合结构, 其剩余速度为 565.6 m/s, 远大于位置 1 和位置 3 处剩余速度, 表明该位置的抗侵彻性能最差; 约在 50~55 μs 左右, 位置 1 和位置 3 处的弹丸相继穿透靶板, 其中位置 1 处的剩余速度为 456.4 m/s, 略小于位置 3 处的 477 m/s, 说明该位置的抗侵彻性能最优。

为进一步得到复合结构的吸能特性, 利用仿真结果对弹丸的侵彻过程进行分析。3 种情况下不同位置处各子结构的吸能对比如图 9(b)~图 9(d) 所示, 图 10 为弹丸侵彻过程中的应力变化云图。



(b) 位置1处各子结构吸能



(d) 位置3处各子结构吸能

图9 不同位置处仿真速度时程变化及各子结构吸能量

Fig. 9 Variation of the simulated velocity and the energy absorption of each substructure at different positions

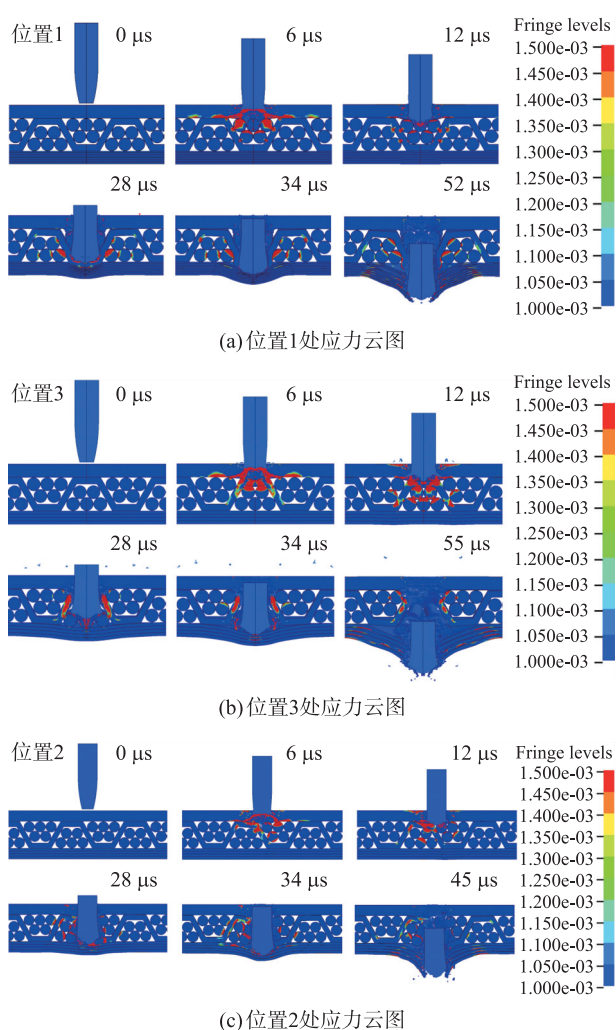


图 10 3 种情况下弹丸侵彻过程中的应力云图

Fig. 10 Stress contours during projectile penetration in three cases

当弹丸冲击陶瓷面板时陶瓷发生碎裂,应力沿径向传播产生径向裂纹。图 9 和图 10 中,3 种情况下陶瓷面板的破碎与耗能情况大致相同,位置 3 和位置 2 处由于受陶瓷背后波纹铝板的支撑,吸能量略有上升,约在 12 μs 时形成陶瓷锥。由图 9(a)可以看出,大约在 28 μs 左右,3 种情况下的速度明显不同,此时弹丸正处于对波纹芯层侵彻的末尾,此阶段波纹铝板的扩孔及陶瓷棒的破碎吸能共同构成弹丸动能的耗散。结合图 9(b)~图 9(d)可以看出,位置 3 处波纹铝板在侵彻初期便发生能量变化,产生了塑性变形;位置 2 和位置 1 处分别在 10 μs 以及 15 μs 左右开始产生能量变化,且位置 1 和位置 3 处铝板吸能小于位置 2 处。参考试验结果可知,位置 2 处由于斜边的存在,波纹铝板变形扩孔面积较另外两处更大,吸能更多。在此阶段,波纹铝板和

UHMWPE 背板以及多根陶瓷棒间相互作用共同作为陶瓷棒的支撑及边界约束,影响着陶瓷材料的流动。

图 10 中,应力波通过陶瓷棒的接触边界传递到相邻陶瓷棒中,发生第二阶段的碎裂,使得陶瓷棒破碎断裂产生的碎块颗粒继续相互挤压,阻碍弹丸的侵彻。同时波纹铝板和 UHMWPE 背板对动态冲击具有良好的吸能特性,两者被穿透后陶瓷棒才会失去作用。位置 1 处的陶瓷棒由于梯形铝板下底和 UHMWPE 背板的共同支撑,破碎更为彻底,吸能更多。在整个侵彻过程中,波纹铝板和 UHMWPE 背板对陶瓷棒的结构限制和边界约束,对衰减冲击波以及预防陶瓷碎片崩落起一定作用,进而提高了复合结构的抗侵彻能力。相较位置 1 和位置 3,位置 2 处弹丸直接侵彻区域陶瓷棒的防护面积更小,吸能更低。但弹丸侵彻波纹芯层后产生的偏转以及铝板的大面积扩孔作用同样改善了此处的抗侵彻性能。UHMWPE 背板不同位置的吸能大致相同,其中位置 2 处剩余速度高于其它两个位置,这是因为弹丸与此处 UHMWPE 背板作用时间短,吸能量略低。

4 结论

本文设计了一种梯形波纹铝板填充陶瓷棒的复合结构,选取 3 个典型的弹着点开展了 7.62 mm 穿甲弹弹道冲击试验和数值仿真,得到以下结论:

①陶瓷板主要依靠破碎、崩裂形成陶瓷锥吸收弹丸能量,其裂纹沿侵彻处向周围发散;陶瓷棒在与弹丸直接接触处产生破碎崩裂的同时,在距离弹靶作用中心不同位置处会产生不同模式的剪切断裂,进而吸收能量。

②梯形波纹铝板填充陶瓷棒复合结构作为非均质靶,不同弹着点的抗侵彻能力由于波纹芯层吸能的差异而有所不同。位置 1 和位置 3 处陶瓷防护面积大,陶瓷粉碎彻底,抗侵彻能力均优于位置 2 处;位置 1 处,由于梯形铝板下底和 UHMWPE 背板共同的支撑约束作用相比于位置 3 处抗侵彻能力略有提高;在弹丸侵彻位置 2 处时,弹丸产生的偏转及铝板的大面积扩孔,改善了此处的抗侵彻能力。位置 1 处对比位置 2 与位置 3 处弹道极限速度分别提升了 20.45% 和 8.14%。

③背板的支撑作用及波纹铝板的边界约束作用对防弹性能的提升有较大的影响。合理设计背板,改变波纹结构的材料及形状,对于提升复合结构的

抗侵彻能力有较大的帮助。

参考文献

- [1] AN X, YANG J, TIAN C, et al. Penetration resistance of hybrid metallic honeycomb structures with ceramic insertions against long-rod tungsten projectiles [J]. Composite Structures, 2018, 189: 488–497.
- [2] 骆伟. 混杂夹层结构低速冲击及剩余弯曲强度研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2018.
LUO Wei. Study on low-velocity impact and residual bending strength of hybrid sandwich structure [D]. Beijing: China Ship Research Institute, 2018. (in Chinese)
- [3] 许俊祥. 舰艇装甲抗反舰导弹侵彻效应研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
XU Junxiang. Study on the penetration effect of anti-ship missile to the warship [D]. Taiyuan: North University of China, 2017. (in Chinese)
- [4] 夏鸿雁, 侯润, 张钱城, 等. 高性能混凝土填充金属三明治夹层波纹板的抗侵彻性能[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(8): 1025–1031.
XIA Hongyan, HOU Run, ZHANG Qiancheng, et al. Ballistic resistance of metal corrugated sandwich plates filled with high performance concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(8): 1025–1031. (in Chinese)
- [5] 郭锐, 南博华, 周昊, 等. 点阵金属夹层结构抗侵彻实验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(24): 45–50
GUO Rui, NAN Bohua, ZHOU Hao, et al. Experiment assessment of the ballistic response of a hybrid-cored sandwich structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(24): 45–50. (in Chinese)
- [6] YUNGWIRTH J C, O'CONNOR J, ZAKRAYSEK A, et al. Explorations of hybrid sandwich panel concepts for projectile impact mitigation [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2011, 94: 62–75.
- [7] NI C, LI Y, XIN F, et al. Ballistic resistance of hybrid-cored sandwich plates: numerical and experimental assessment [J]. Composites Part A, 2013, 46: 69–79.
- [8] WADLEY H N G, DHARASENA K P, O'MASTA M R, et al. Impact response of aluminum corrugated core sandwich panels [J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 62: 114–128
- [9] O'MASTA M R, COMPTON B, GAMBLE E, et al. Ballistic impact response of an UHMWPE fiber reinforced laminate encasing of an aluminum-alumina hybrid panel [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 86: 131–144
- [10] LIU W, CHEN Z, CHENG X, et al. Design and ballistic penetration of the ceramic composite armor [J]. Composites Part B, 2016, 84: 33–40.
- [11] TOMOHIRO Yokozeki, AYA Sugiura. Development of variable camber morphing airfoil using corrugated structure [J]. Journal of Aircraft, 2014, 51(3): 1023–1030.
- [12] TOMOHIRO Yokozeki, SHINICHI Takeda, TOSHIO Ogasawara, et al. Mechanical properties of corrugated composites for candidate materials of flexible wing structures [J]. Composites Part A, 2006, 37: 1578–1586.
- [13] BARADESWARAN A, PERUMAL A E. Study on mechanical and wear properties of Al 7075/Al2O3/graphite hybrid composites [J]. Composites Part B, 2014, 56: 464–471.
- [14] GRUJICIC M, PANDURANGAN B, ZECEVIC U, et al. Ballistic performance of alumina/S-2 glass-reinforced polymer-matrix composite hybrid lightweight armor against armor piercing (AP) and non-AP projectiles [J]. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures 2007; 3: 287–312.
- [15] 赵国志. 穿甲工程力学 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
ZHAO Guozhi. Armor-piercing engineering mechanics [M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1992. (in Chinese)
- [16] 余毅磊, 王晓东, 任文科, 等. 陶瓷/金属复合靶受 12.7 mm 穿甲燃烧弹侵彻时弹靶破碎特征 [J]. 兵工学报, 2022, 43(9): 2307–2317.
YU Yilei, WANG Xiaodong, REN Wenke, et al. Fragmentation characteristics of 12.7 mm armor-piercing incendiary projectile and ceramic/metal composite target during penetration [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(9): 2307–2317. (in Chinese)
- [17] 孔晓鹏. 陶瓷复合板脱粘机理和抗多发打击研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
KONG Xiaopeng. Study on the debonding mechanism and the protection capability of ceramic composite armors against multi-hit [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [18] 朱新成, 狄长安, 林朝东. 玻璃纤维复合装甲抗侵彻性能数值模拟 [J]. 弹道学报, 2021, 33(3): 82–88.
ZHU Xincheng, DI Changan, LIN Chaodong. Numerical simulation of anti-penetration performance of glass fiber composite armor [J]. Journal of Ballistics, 2021, 33(3): 82–88. (in Chinese)
- [19] 辛壮壮, 张向东, 江睿毅, 等. 弹头角速度与侵彻倾角对铝合金薄板损伤分析 [J]. 弹道学报, 2022, 34(4): 23–29.
XIN Zhuangzhuang, ZHANG Xiangdong, JIANG Ruiyi, et al. Influence of warhead angular velocity and penetration angle on damage performance of aluminum alloy sheet [J]. Journal of Ballistics, 2022, 34(4): 23–29. (in Chinese)
- [20] TAN P. Numerical simulation of the ballistic protection performance of a laminated armor system with pre-existing debonding/delamination [J]. Composites Part B, 2014, 59, 50–59.
- [21] 肖露, 程建芳, 柴晓明, 等. 层间混杂复合材料的弹道侵彻性能研究 [J]. 浙江理工大学学报, 2013, 30(4): 471–476.
XIAO Lu, CHENG Jianfang, CHAI Xiaoming, et al. Study on ballistic penetration property of interply hybrid composite material [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2013, 30(4): 471–476. (in Chinese)