

陶瓷混杂点阵夹芯超结构的承载与抗多点侵彻性能*

郑冰倩^{1,2}, 强鹭升³, 宋萧彤^{1,2}, 倪长也³, 张瑞^{1,2}

- (1. 武汉纺织大学 纺织新材料与先进加工技术国家重点实验室, 武汉 430200;
2. 武汉纺织大学 纺织科学与工程学院, 武汉 430200;
3. 南京航空航天大学 航空航天结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

(我刊青年编委倪长也来稿)

摘要: 轻巧、可承载、抗侵彻一体化超结构相较于传统承载结构与披挂装甲, 可有效减轻质量并提高空间利用率, 在军事装备与国防设施中具有广阔的应用前景. 该文基于陶瓷混杂点阵夹芯超结构, 对比了超结构与传统波纹结构在三点弯曲载荷下的承载-位移曲线, 并通过实验研究了超结构在多点弹道冲击下的防护性能与抗侵彻机理. 研究表明, 陶瓷混杂点阵夹芯超结构在弯曲载荷下主要发生陶瓷脆性断裂、面板塑性断裂与胶层开裂等失效, 其承载能力高于传统波纹结构. 此外, 该文还发现冲击位置与芯体类型影响超结构的抗多发特性, 陶瓷混杂蜂窝芯体超结构的抗多发性能优于陶瓷混杂波纹芯体超结构. 波纹结构在纵向对陶瓷缺乏约束, 而蜂窝芯体对陶瓷的约束作用更强, 从而可限制陶瓷损伤面积, 使得抗侵彻性能随着冲击次数的增多而基本保持一致.

关键词: 超结构; 承载; 抗侵彻性能; 混杂

中图分类号: O385 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.450101

Load-Bearing and Multi-Point Ballistic Performances of Hybrid Sandwich Meta-Structures

ZHENG Bingqian^{1,2}, QIANG Lusheng³, SONG Xiaotong^{1,2},
NI Changye³, ZHANG Rui^{1,2}

- (1. *State Key Laboratory of New Textile Materials and Advanced Processing Technologies, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, P.R.China;*
2. *School of Textile Science and Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, P.R.China;*
3. *State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P.R.China)*

(Contributed by NI Changye, M.AMM Youth Editorial Board)

Abstract: Lightweight, load-bearing, and penetration-resistant integrated meta-structures have significant potential in military equipment and defense facilities, as they can effectively reduce weight and improve space utilization compared to traditional load-bearing structures and armors. Based on hybrid sandwich meta-structures,

* 收稿日期: 2024-04-09; 修订日期: 2024-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(12302187;12372136);湖北省自然科学基金青年项目(2023AFB092)

作者简介: 郑冰倩(2000—),女,硕士生(E-mail: zzbq991215@163.com);
张瑞(1995—),男,讲师(通讯作者, E-mail: zr19950122@163.com).

引用格式: 郑冰倩, 强鹭升, 宋萧彤, 倪长也, 张瑞. 陶瓷混杂点阵夹芯超结构的承载与抗多点侵彻性能[J]. 应用数学和力学, 2024, 45(8): 1037-1046.

the load-deflection curves of the meta-structure and the traditional corrugated sandwich under 3-point bending loads were compared. The protective performance and energy absorption mechanism of the meta-structure under multiple ballistic impacts were experimentally studied. The research results indicate that, the hybrid sandwich meta-structure mainly experiences brittle fracture of ceramic, plastic fracture of face-sheets, and debonding of the adhesive layer under bending loads. Its load-bearing capacity is higher than those of traditional corrugated sandwiches. Furthermore, the study also reveals that the impact location and the lattice core type influence the multi-impact resistance of the meta-structure, with the honeycomb core demonstrating superior multi-impact resistance compared to the corrugated core. The corrugated sandwich lacks longitudinal constraints on the ceramic, while the honeycomb core provides stronger constraints on the ceramic, limiting the area of ceramic damage. As a result, the penetration-resistant performance remains relatively consistent as the number of impacts increases.

Key words: meta-structure; load-bearing; ballistic performance; hybrid

0 引言

传统的结构设计,如均质板和加筋板,主要关注承载功能。然而,随着多功能一体化设计思路的出现,仅仅关注承载已经无法满足现实的需求^[1]。在各类军事设备和结构中,承载结构面临子弹和碎片高速冲击的威胁。为了应对这类威胁,常见的做法是在承载结构上加装防护结构,形成设计上的冗余^[2-3]。通过综合考虑承载和防护两方面的需求,构建具备轻巧、承载和抗侵彻性能的超结构,可有效减轻质量并提高空间利用率,以满足军事装备与国防设施的实际应用需求。

传统的轻质防护结构通常由陶瓷和塑性背板黏接而成,其本身并不具备承载功能,而是需要额外加装在承载结构上。它的防护原理是通过陶瓷材料来迫使弹丸碎裂,从而减少弹丸的动能并扩大冲击载荷的作用面积;陶瓷碎片与弹丸的剩余能量则通过背板的变形来吸收^[4]。然而,陶瓷材料是一种典型的脆性材料,在冲击下容易出现较大的损伤区域。当受到单次冲击时,整体结构的完整性可能会受到破坏,从而降低其抵抗多次打击的能力^[5]。

点阵夹芯结构具有轻巧和多功能的特点,在结构承载、能量吸收和吸声降噪等方面展现出了明显的优势^[6-8]。特别在爆炸载荷下,相对于等面密度均质板,点阵夹芯结构具有更小的背面变形^[9-10]。然而,在破片和弹丸高速冲击下,Yungwirth等^[11]的实验结果显示,点阵夹芯结构和等面密度均质板的抗侵彻性能相当。研究人员提出了在点阵孔隙中填充陶瓷的方法,形成混杂点阵夹芯结构,以提升弹道阻力^[12]。Wadley等^[13-14]系统分析了陶瓷混杂波纹夹芯结构在不同冲击位置下的动态响应和变形破坏机理,并研究了芯体拓扑构型对侵彻响应的影响。Ni等^[15]通过仿真和实验研究发现:与仅填入陶瓷棱柱的金字塔点阵结构相比,环氧树脂的额外填入可在面密度仅提升7%的情况下将弹道极限速度提升60%以上。然而,现有研究仅关注于陶瓷混杂点阵夹芯超结构的抗侵彻性能,且多局限于单次弹丸打击,未对超结构的承载-抗侵彻性能进行一体化设计,也未对适用于实际工况的多点弹丸打击进行考虑。

综上所述,本文基于承载-抗侵彻一体化结构的设计需求,系统研究了陶瓷混杂点阵夹芯超结构的承载特性与抗多点侵彻特性。第1节介绍了三点弯曲实验方法与实验结果,通过对比载荷-位移曲线与变形过程分析了超结构的失效机理;第2节介绍了超结构的抗多点侵彻性能,观测了样件穿透状态、变形形貌与内部损伤情况,进而对超结构的芯体构型进行了改进;第3节给出了全文的主要结论。

1 承载性能

1.1 样件与实验设计

我们首先考察陶瓷混杂波纹夹芯超结构的承载性能。通过挤压的方式制备波纹夹芯结构,挤压型材为6063-T6铝合金,其弹性模量为69 GPa,屈服强度为161 MPa。如图1(a)所示,波纹结构的总厚度为10.4 mm,其中面板厚度为1.2 mm,芯体高度为8 mm,芯体的厚度为0.9 mm。超结构的制备流程为,将无压烧结碳化硼陶瓷插入波纹通道内,并使用环氧树脂填充陶瓷与波纹板之间的间隙,直至多余的树脂溢出,最后在室温下固化树脂。陶瓷柱的高为6.7 mm,底边长度为11.5 mm,陶瓷与波纹芯体之间的胶层平均厚度为0.29 mm。

分别对波纹结构与超结构进行了三点弯曲实验测试,如图 1(b)所示.用于三点弯曲的试样长为 170 mm,宽为 55.5 mm,高为 10.4 mm.三点弯曲的支座与压头直径为 20 mm,支座间距为 150 mm.根据 ASTM C393-11 对夹层结构弯曲性能测试标准规定,实验加载速率控制在 0.5 mm/min 以实现准静态加载.实验过程中载荷与位移数据均由 MTS 系统的力传感器和位移传感器获得.为捕捉结构变形破坏模式及其演化过程,实验中采用高分辨率摄像机对整个过程进行拍摄.为了系统比较两类结构的承载能力,分别施加横向弯曲载荷和纵向弯曲载荷.为了保证重复性,每类样件制备 3 个并进行测试,样件参数如表 1 所示.

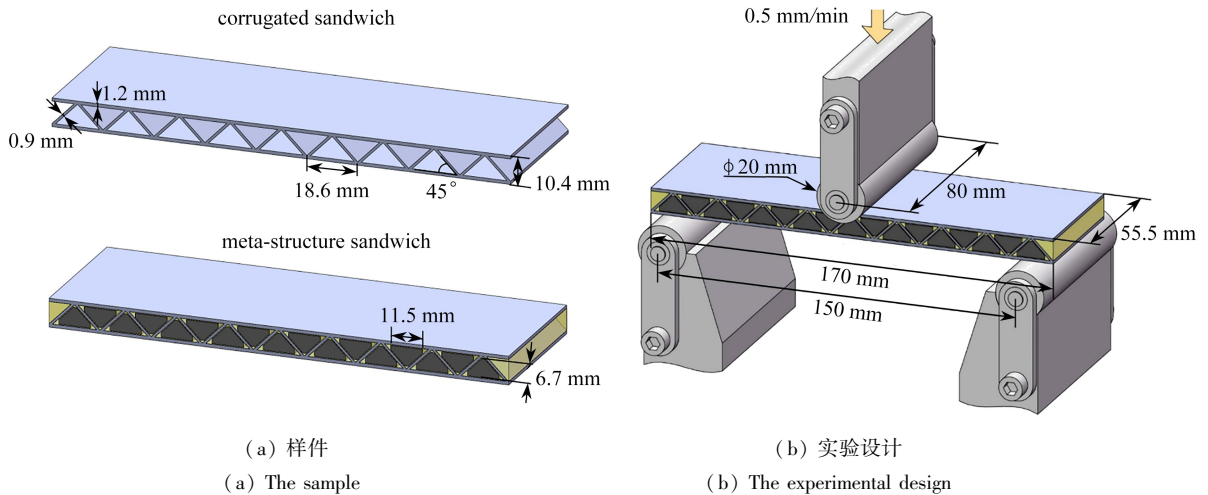


图 1 波纹结构与超结构的三点弯曲试验

Fig. 1 The 3-point bending tests of 2 sandwich beams with a corrugated core and a meta-structure, respectively

表 1 三点弯曲实验样件

Table 1 Samples for 3-point bending

number	structure	weight m/g	areal density $\rho_a / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$
T-E-1	corrugated sandwich	91	9.81
T-E-2		88	9.49
T-E-3		88	9.49
L-E-1	corrugated sandwich	88	9.49
L-E-2		88	9.49
L-E-3		88	9.49
T-C-1	meta-structure sandwich	222	23.95
T-C-2		215	23.20
T-C-3		215	23.20
L-C-1	meta-structure sandwich	221	23.84
L-C-2		224	24.17
L-C-3		217	23.41

1.2 实验结果

图 2 展示了波纹结构和超结构的平均力-位移曲线.总体而言,超结构具有更高的抗弯刚度、峰值位移与峰值载荷.如图 2(a)所示,在横向弯曲情况下,波纹结构在位移达到 2.3 mm 时达到峰值载荷 3.88 kN,此后随着位移的增加,载荷下降趋势逐渐减缓.超结构曲线的非线性段较长,当位移达到 5.4 mm 时达到峰值载荷 4.48 kN,随后发生断崖式下降,完全失去承载能力.如图 2(b)所示,在纵向弯曲情况下,波纹结构在位移达到 2.4 mm 时达到峰值载荷 4.5 kN,然后缓慢下降.而超结构在位移达到 4 mm 时达到峰值载荷 5.87 kN,并以相对较快的速度下降.

图 3(a)给出了波纹结构横向弯曲下的载荷-位移曲线和加载过程中 4 个典型时刻的变形过程.从载荷-位移曲线可以看出,载荷在经过一个线弹性上升后在点②进入非线性段,意味着面板发生屈服.随后相应的曲线上升变得平缓,在点③到达峰值载荷,最后快速下降.从实验变形过程④可以看出,达到峰值后载荷便发

生迅速大幅下降从而丧失承载能力,原因在于上面板在压缩载荷下发生局部屈曲。

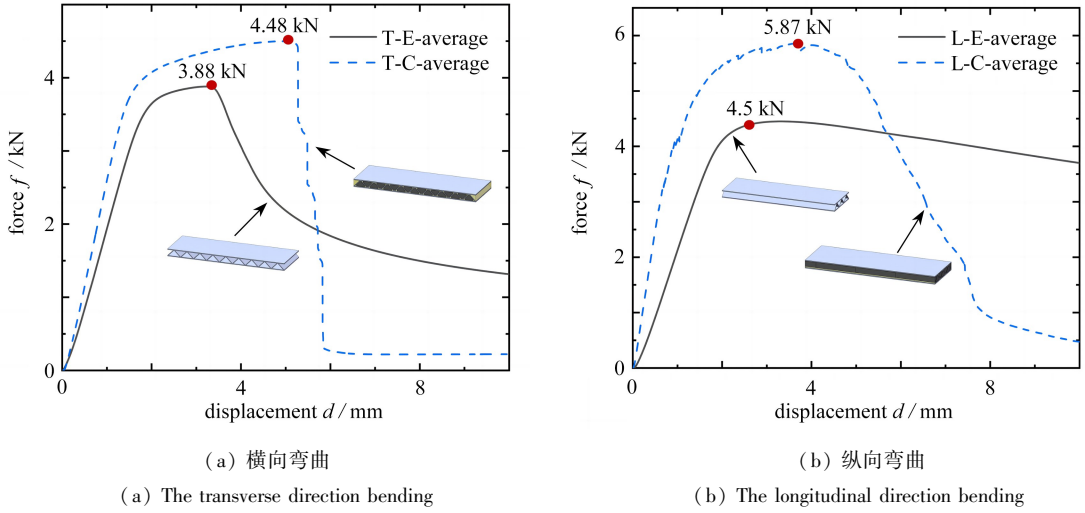


图2 三点弯曲实验下波纹结构和超结构的平均力-位移曲线

Fig. 2 Average force-displacement curves of corrugated sandwich and meta-structure for the 3-point bending tests

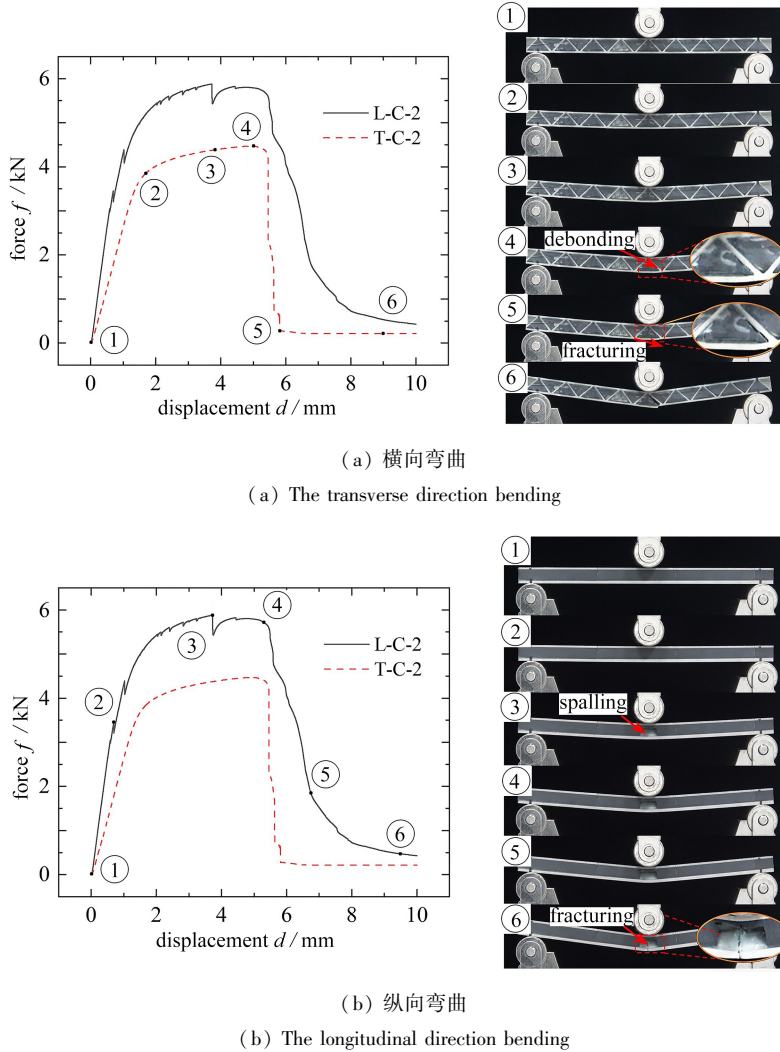


图3 波纹结构在三点弯曲实验下的载荷-位移曲线和变形过程图

Fig. 3 Force-displacement curves and deformation processes of corrugated sandwiches

图 3(b) 给出了波纹结构纵向弯曲下的载荷-位移曲线和加载过程中 4 个典型时刻的变形过程.与横向弯曲相似,纵向弯曲下波纹结构的载荷-位移曲线仍然表现为一个线弹性的快速上升与非线性的平缓上升.到达峰值力后,载荷随着位移的增大而缓慢降低.从实验变形过程④可以看出,面板与芯体的屈服为主要破坏模式.

图 4(a) 给出了超结构横向弯曲下的载荷-位移曲线和加载过程中 6 个典型时刻的变形过程.对于横向弯曲,当压头的位移为 2 mm 时,超结构进入非线性响应.当超结构变形至点③时,可观察到压头下方波纹芯体与陶瓷间的胶层开裂.加载曲线在点④时达到峰值,此时可在超结构表面观察到胶层中的裂纹沿着陶瓷与波纹之间的缝隙扩展.继续加载将导致后面板发生断裂,同时在实验过程中可以听到清脆的断裂声,此时载荷曲线垂直式下降.观察实验变形过程⑤可以发现,此时陶瓷柱已经和波纹芯体完全分离.图 4(b) 的曲线显示在纵向弯曲下超结构具有更大的刚度.当压头载荷从点②到点③移动的过程中,可听到多次清脆的断裂声,意味着内部陶瓷与树脂的断裂,因此曲线上有些许“毛刺”.当超结构变形至点③时,最外部陶瓷由于断裂而发生剥落,导致曲线的突然下降.观察实验变形过程④可以发现,下面板中心由于拉伸作用开始出现局部颈缩,此时曲线快速下降,直到点⑥时芯体和后面板完全断裂.

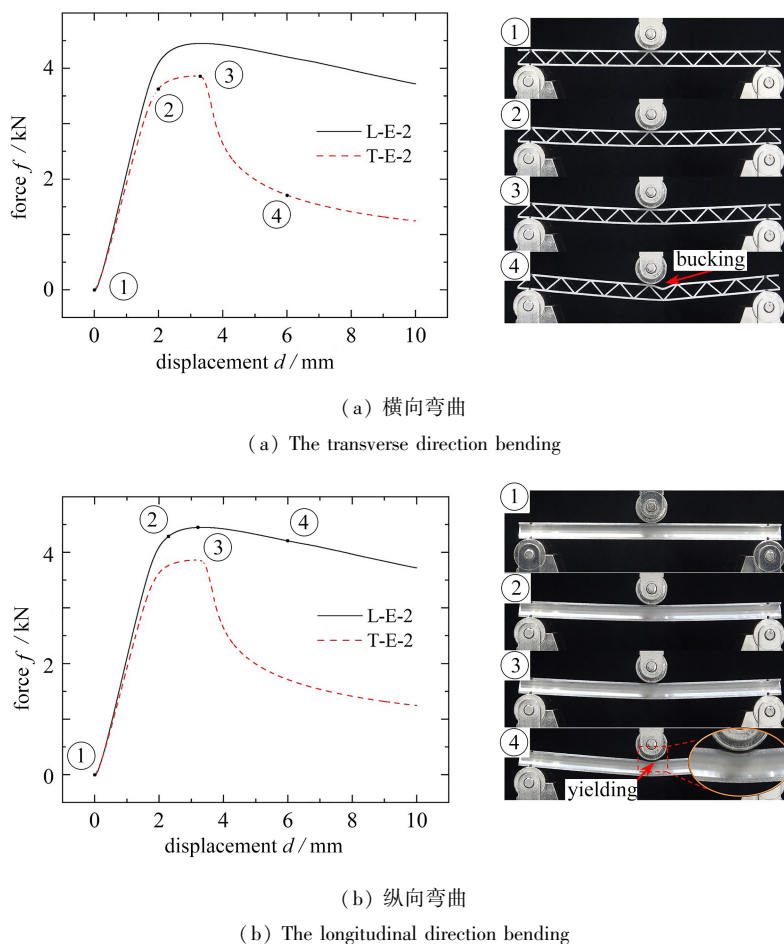


图 4 超结构在三点弯曲实验下的载荷-位移曲线和变形过程图

Fig. 4 Force-displacement curves and deformation processes of meta-structure sandwiches

2 抗多点侵彻性能

2.1 弹道实验

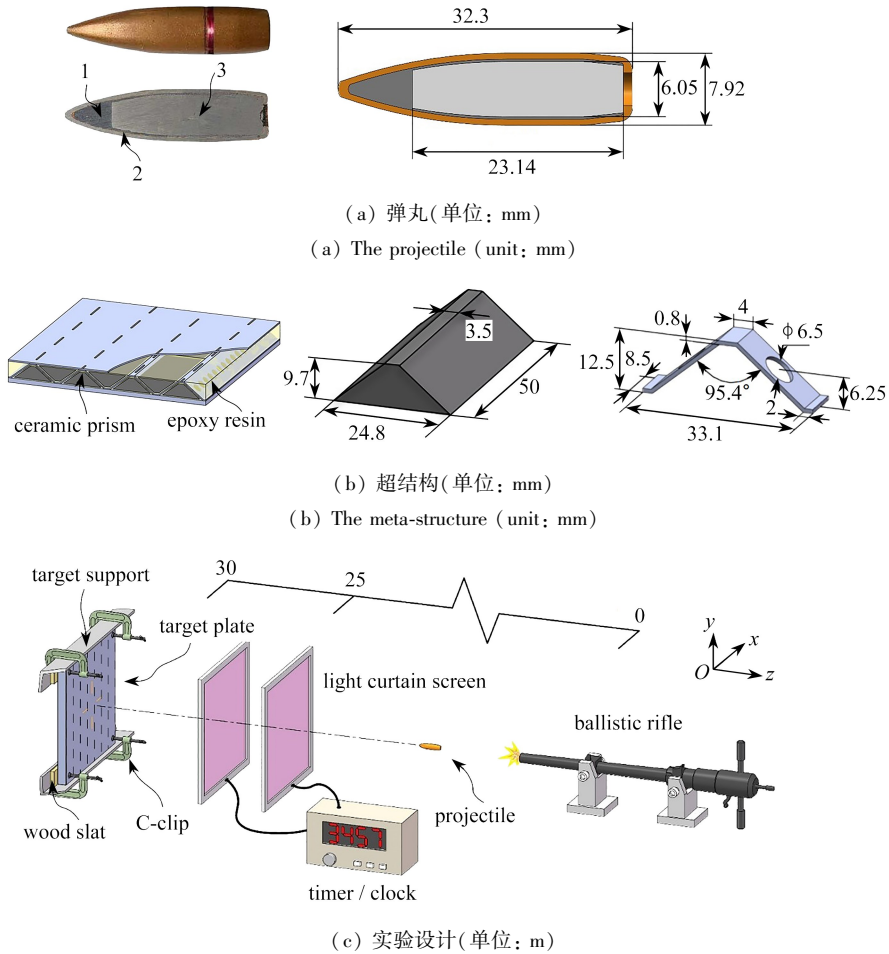
多点弹道冲击实验中使用 7.62 mm×54 mm 的 53 式普通弹丸,其质量为 9.6 g.如图 5(a)所示,弹丸由铅填料、覆铜钢被夹和低碳钢芯三部分组成,钢芯重约 4.5 g.为了实现弹丸的成功防护,对超结构的结构形式与材料进行了调整,如图 5(b)所示.超结构的面板与芯体均由不锈钢板制成,芯体和面板采用激光焊接进行

连接.前面板和芯体的厚度分别为 1 mm 和 0.8 mm.波纹芯体的高度为 12.5 mm.为进一步减轻波纹重量并增强环氧树脂浇灌时的流动性,在波纹板上进行了穿孔,穿孔直径为 6.5 mm,孔间距为 8.5 mm.填充的陶瓷为无压烧结的碳化硅,陶瓷柱的高为 9.7 mm,底边长为 24.8 mm,陶瓷与波纹芯体之间的胶层平均厚度为 0.8 mm.制备了两类超结构样件,分别具有 2 mm 和 3.3 mm 的后面板,如表 2 所示.如图 5(c) 所示,超结构被夹持在距离枪口 30 m 的靶架上.为测量弹丸的入射速度,使用一对间距为 30 cm 的光幕靶.该对光幕靶距离枪口约 25 m 远并与计时器相连,通过记录弹丸通过两道光幕的时间差,从而计算出弹丸的平均速度.在实验中准备了两块靶板 A 和一块靶板 B,分别对两块靶板 A 进行了单点单次打击,对靶板 B 进行了多点多次打击.

表 2 靶板的配置

Table 2 Configurations of target plates

target	thickness of the front sheet t_f /mm	thickness of the back sheet t_b /mm	areal density $\rho_a / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$
A	1	2	59
B	1	3.3	69.2



(c) The experimental design (unit: m)

图 5 抗多点侵彻实验装备示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the experimental setup

2.2 实验结果

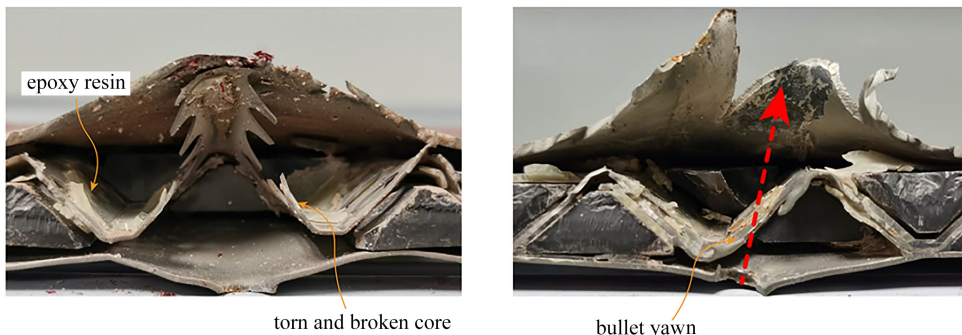
表 3 展示了冲击实验的结果,其中 N 代表未穿孔,P 代表穿孔.弹道冲击点可根据与波纹芯体的相对位置,分为基底冲击与侧边冲击.对于未穿孔的冲击,给出了背面的鼓包高度 w 和鼓包直径 D .由表 3 可以发现,当冲击位置与冲击速度相似时,增加后面板厚度会使背部鼓包高度大大减少.对靶板 A 而言,将冲击位置从波纹基底改变为波纹侧边时,冲击结果从未穿透转变为穿透.在实验中靶板 B 成功抵抗了前 3 发弹丸的冲击,其背部鼓包高度与鼓包直径没有剧烈变化,但在第 4 发弹丸冲击时发生了穿透.

表 3 弹道实验结果

Table 3 Experimental results

target	No.	$V_i / (m \cdot s^{-1})$	impact location	experiment		
				N/P	w / mm	D / mm
A	1	827	base	N	15.2	100
	2	825	side	P	-	-
B	1	824	base	N	10.8	102
	2	829	base	N	9.5	115
	3	821	base	N	10.5	113
	4	830	side	P	-	-

图 6(a)为超结构遭受基底冲击后的变形与破坏.可以明显观察到前面板的冲塞孔、面板和芯体之间的脱焊以及环氧树脂的破碎.此外,冲击点附近 3 个单胞内的陶瓷发生完全的破碎,芯体在变形过程中被撕裂,后面板出现了大范围的塑性变形,这些变形与失效可以有效耗散弹丸的冲击能量.在图 6(b)中,可以明显看到后面板上的花瓣状撕裂和弹丸偏航的轨迹.可以推断,在侧边冲击发生时,弹丸下方的非对称结构会导致弹丸两侧受力不均衡,从而发生偏转.同样,从图 6(b)中也可观察到前面板的冲塞孔、面板和芯体的脱焊、环氧树脂的破碎等,但此时陶瓷的碎裂仅局限于相邻的两个单胞内.此外,花瓣状的破坏模式表明,即使弹丸没有被成功拦截,其剩余速度也不高.

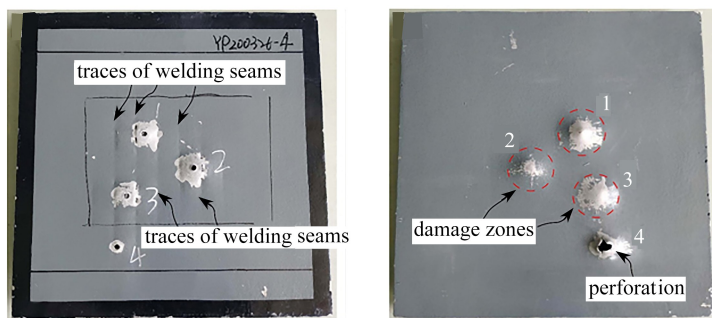


(a) 基底冲击 (a) The base impact (b) 侧边冲击 (b) The side impact

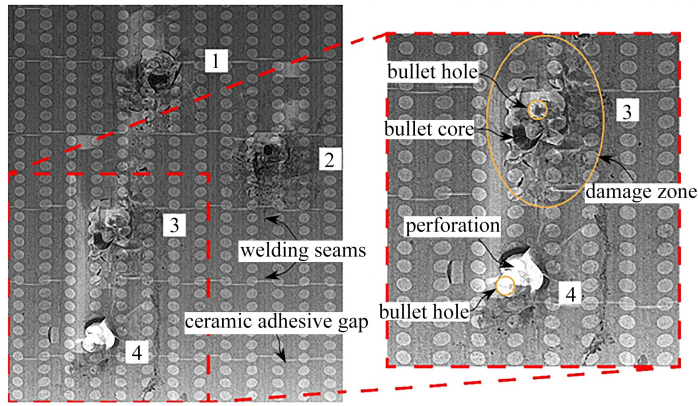
图 6 靶板 A 被弹丸侵彻后的横切面

Fig. 6 Transverse cross-sections of the target A after being penetrated by the projectile

图 7(a)给出了超结构经过多次冲击后的前后表面形貌,可以观察到超结构整体状态依然比较完整,因此仍具有一定的承载能力.通过前表面的焊缝痕迹可以准确判断冲击位置.前 3 发为基底冲击,各在不同的波纹通道内,而第 4 发为侧边冲击,与第 3 发在同一波纹通道内部.从后表面可以看出在前 3 发打击下,后面板发生了较大的塑性变形,变形区域直径在 100 mm 以上,超过 3 个单胞宽度.



(a) 前表面 (a) The front view (b) 后表面 (b) The rear view



(c) DR 视图

(c) The DR view

图7 靶板 B 经过多次冲击后的细节图

Fig. 7 The detail view of the Target B after multi-hit

而第4发弹丸穿透后面板且出现了花瓣状的撕裂破坏。为了探究第4发弹丸的穿透原因,使用了X射线数字成像技术(digital radiograph, DR)对靶板内部损伤进行了分析,如图7(b)所示。可以看到,第3发打击所造成的损伤区域与第4发的打击位置较为靠近。因此,当第4发打击发生时,受冲击区域的陶瓷可能已受到损伤。另一方面,第4发与第3发打击位置在同一波纹通道内部,第3发冲击所造成的损伤会导致受冲击区域的陶瓷在波纹纵向方向缺乏有效约束,从而降低了陶瓷对弹丸的磨损能力。

2.3 结构改进

由2.2小节的结果可以分析得出,陶瓷混杂波纹夹芯超结构的抗多点侵彻能力受到冲击位置的影响。当冲击位置位于波纹侧边,且多个冲击位于同一个波纹通道内部时,超结构的抗侵彻性能降低。为了改进这一位置敏感性,进一步设计研究陶瓷混杂蜂窝夹芯超结构的抗多点侵彻能力。蜂窝结构相较于波纹结构而言,可对填充陶瓷提供面内两个方向的约束,更能有效地减缓陶瓷在多点冲击下的内部损伤情况。如图8所示,所设计的陶瓷混杂蜂窝夹芯超结构的面板为2 mm,四方蜂窝芯体厚度为1 mm,高度为5 mm,单胞边长为50 mm。为了方便面板与芯体的焊接,在芯体上设计了长为25 mm的凸榫。填充的陶瓷块材料为氧化铝,陶瓷与蜂窝芯体之间的胶层平均厚度约0.1 mm。弹道实验基于二级轻气炮进行,弹丸采用的材料为AISI 4340钢,直径为7.62 mm,长度为20 mm。制备了两个样件,分别在蜂窝中心位置和节点处进行了3次冲击。

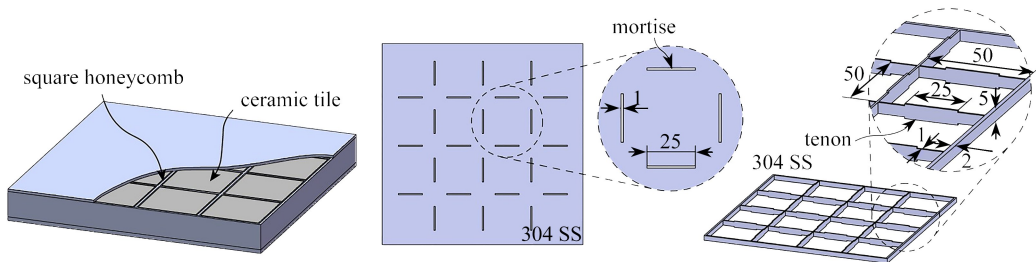


图8 陶瓷混杂蜂窝夹芯超结构示意图(单位: mm)

Fig. 8 Schematic diagram of the hybrid honeycomb sandwich meta-structure (unit: mm)

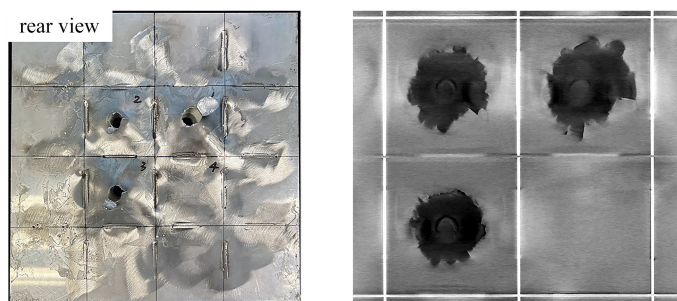
表4展示了多点冲击实验的结果,其中N代表未穿孔,P代表穿孔。可以发现:当弹丸冲击蜂窝单胞中心点时,弹丸穿透超结构;当弹丸冲击节点时,弹丸均未穿透结构。图9(a)展示了弹丸对3个不同蜂窝单胞中心点的冲击实验结果,后面板出现了明显的花瓣型撕裂破坏,进一步观察着靶区域的X射线计算机断层成像(computed tomography, CT)结果,发现每次冲击下陶瓷的破碎损伤均局限于单个单胞,没有影响相邻单胞的陶瓷,CT图左下角的陶瓷仍保持完好状态。因此,前序冲击所造成的损伤对后续冲击过程基本无影响。图9(b)展示了弹丸对3个不同蜂窝节点处的冲击实验结果。冲击后弹丸均嵌在结构中,后面板主要为面板塑性变形,背部隆起,且可以看到有焊缝断裂。从CT图可以看出,弹丸冲击影响范围基本保持一致,蜂窝芯体的壁

板发生不同程度的断裂.以上结果说明,在多点冲击下,蜂窝芯体节点处的抗侵彻能力强于中心处,超结构的抗侵彻性能基本保持一致.

表 4 弹道实验结果

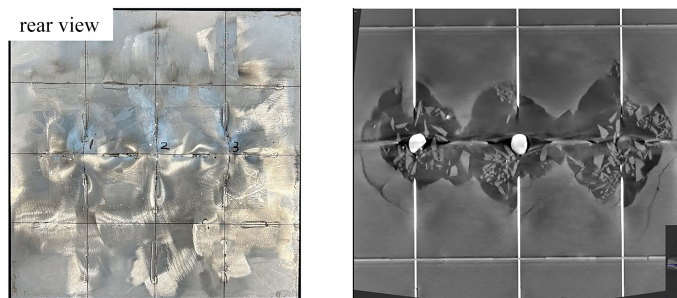
Table 4 Experimental results

impact location	No.	$V_i / (m \cdot s^{-1})$	N/P
center	1	412	P
center	2	402	P
center	3	403	P
node	1	385	N
node	2	390	N
node	3	388	N



(a) 中心冲击

(a) The center impact



(b) 节点冲击

(b) The node impact

图 9 多点弹丸冲击下陶瓷混杂蜂窝夹芯超结构的背部视图与 CT 扫描视图

Fig. 9 The back view and the CT view of the hybrid honeycomb sandwich meta-structure under multi-impact loads

3 结 论

针对陶瓷混杂点阵夹芯超结构在承载-抗侵彻双功能结构上的应用潜力,本文通过三点弯实验对比分析了波纹结构和超结构的承载性能,并对超结构的抗多点侵彻性能进行了冲击实验研究,主要结论如下:

1) 波纹结构在弯曲载荷下主要发生面板的屈服与屈曲失效,而超结构在弯曲载荷下主要发生陶瓷脆性断裂、面板塑性断裂与胶层开裂等失效,后者具有更高的抗弯刚度、峰值位移与峰值载荷.

2) 陶瓷混杂波纹夹芯超结构的抗侵彻性能对冲击位置具有敏感性,冲击点位于波纹基底时抗侵彻性能强,冲击点位于波纹侧边时抗侵彻性能弱.在多点冲击后超结构可以保持完整性,但当多个冲击点位于同一个波纹通道内部时,前序损伤导致后续冲击时的约束效应降低,从而造成抗侵彻性能的削弱.

3) 陶瓷混杂蜂窝夹芯超结构在节点处的抗侵彻性能优于在单胞中心处.在多点冲击下,蜂窝芯体对陶瓷的约束作用更强,陶瓷损伤面积被限制.随着冲击次数的增多,超结构的抗侵彻性能基本保持一致.因此陶瓷混杂蜂窝夹芯结构是一种更优的承载-抗侵彻双功能结构.

致谢 本文作者衷心感谢南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室开放课题(MCAS-E-0124Y01)对本文的资助。

参考文献(References):

- [1] 邓通相, 匡格平, 胡兆财, 等. 多再入工况下一体化热防护系统拓扑优化设计[J]. 应用数学和力学, 2023, **44**(11): 1299-1310. (DENG Tongxiang, KUANG Geping, HU Zhaocai, et al. Topology optimizations of integrated thermal protection systems in multiple reentry load cases[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2023, **44**(11): 1299-1310. (in Chinese))
- [2] 柳占立, 初东阳, 王涛, 等. 爆炸和冲击载荷下金属材料及结构的动态失效仿真[J]. 应用数学和力学, 2021, **42**(1): 1-14. (LIU Zhanli, CHU Dongyang, WANG Tao, et al. Dynamic failure simulation of metal materials and structures under blast and impact loading[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2021, **42**(1): 1-14. (in Chinese))
- [3] 李金矿, 万文玉, 刘闯. 形状记忆合金蜂窝结构抗冲击性能研究[J]. 应用数学和力学, 2024, **45**(1): 34-44. (LI Jinkuang, WAN Wenyu, LIU Chuang. Study on impact resistance of shape memory alloy honeycomb structures[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2024, **45**(1): 34-44. (in Chinese))
- [4] 余毅磊, 蒋招绣, 王晓东, 等. 轻型陶瓷/金属复合装甲抗垂直侵彻过程中陶瓷碎裂行为研究[J]. 爆炸与冲击, 2021, **41**(11): 113301. (YU Yilei, JIANG Zhaoxiu, WANG Xiaodong, et al. Research on ceramic fragmentation behavior of lightweight ceramic/metal composite armor during vertical penetration[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, **41**(11): 113301. (in Chinese))
- [5] 包阔, 张先锋, 谈梦婷, 等. 子弹撞击碳化硼陶瓷复合靶试验与数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, **39**(12): 123102. (BAO Kuo, ZHANG Xianfeng, TAN Mengting, et al. Ballistic test and numerical simulation on penetration of a boron-carbide-ceramic composite target by a bullet[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, **39**(12): 123102. (in Chinese))
- [6] GIBSON L J, ASHBY M F. *Cellular Solids: Structure and Properties*[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [7] EVANS A G, HUTCHINSON J W, ASHBY M F. Multi functionality of cellular metal systems[J]. *Progress in Materials Science*, 1998, **43**(3): 171-221.
- [8] XIN F X, LU T J. Sound radiation of orthogonality rib-stiffened sandwich structures with cavity absorption[J]. *Composites Science & Technology*, 2010, **70**(15): 2198-2206.
- [9] DHARMASENA K P, WADLEY H N G, XUE Z, et al. Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, **35**(9): 1063-1074.
- [10] XUE Z, HUTCHINSON J W. A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, **30**(10): 1283-305.
- [11] YUNGWIRTH C J, WADLEY H N G, O'CONNOR J H, et al. Impact response of sandwich plates with a pyramidal lattice core[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, **35**(8): 920-936.
- [12] YUNGWIRTH C J, RADFORD D D, ARONSON M, et al. Experiment assessment of the ballistic response of composite pyramidal lattice truss structures[J]. *Composites (Part B): Engineering*, 2008, **39**(3): 556-569.
- [13] WADLEY H N G, DHARMASENA 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.
- [14] WADLEY H N G, O'MASTA M R, DHARMASENA K P, et al. Effect of core topology on projectile penetration in hybrid aluminum/alumina sandwich structures[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, **62**: 99-113.
- [15] NI C Y, LI Y C, XIN F X, et al. Ballistic resistance of hybrid-cored sandwich plates: numerical and experimental assessment[J]. *Composites (Part A): Applied Science and Manufacturing*, 2013, **46**: 69-79.