聚脲涂覆三维负泊松比点阵结构的静态力学性能研究

黄秀峰[†], 张振华^{†*}

海军工程大学舰船与海洋学院, 武汉 430033

*联系人, E-mail: 2zsz@163.com

†同等贡献

收稿日期: 2020-05-17; 接受日期: 2020-07-10; 网络出版日期: 2021-01-29

国家自然科学基金(编号: 51879270)和海军工程大学研究生创新基金资助项目

摘要 本文针对四面内凹金字塔型负泊松比点阵结构在有无聚脲涂覆两种情况下的静态力学性能进行了试验研究. 采用增材制造方法制作了不同阵列型式的试验模型, 实施了点阵模型的准静态压缩试验和点阵夹层结构的三点弯曲和四点弯曲试验. 试验结果表明, 点阵结构在压缩载荷作用下呈现明显的负泊松比效应. 涂覆聚脲后点阵结构的力学性能有明显提升, 压缩平台应力约为0.6–1.0 MPa; 对于多胞结构, 总吸能、单位体积变形能和比吸能显著高于未涂覆聚脲模型1–2个数量级; 最大吸能效率和压缩利用率大于未涂覆聚脲模型, 最高分别可达40.59%和55.15%. 由于未涂覆聚脲点阵结构会发生早期材料脆断, 其单位体积变形能、比吸能、最大吸能效率和压缩利用率会随单元数量的增加而减小. 涂覆聚脲点阵结构的吸能特性受聚脲涂层的厚度影响较大. 在弯曲载荷作用下, 未涂覆聚脲点阵夹层结构易出现芯层局部压溃现象, 靠近压头部位的芯层最易发生破坏, 且芯层破坏程度逐层降低; 上面板最终呈现折线型变形, 下面板呈现弧形变形模式. 涂覆聚脲点阵夹层结构的上面板早期呈现“U”型变形模式, 且芯层失效范围大幅减小, 下面板变形较无聚脲涂覆点阵夹层结构增大19.61%–42.03%. 研究结果可为设计轻质化和高效吸能的舰艇防护结构提供借鉴.

关键词 负泊松比, 点阵结构, 聚脲, 压缩试验, 多点弯曲试验, 增材制造

PACS: 81.05.LG, 07.10.Pz, 67.80.Cx, 81.05.Qk

1 引言

近年来, 随着技术的不断发展, 点阵结构在航空航天器的设计和大型舰船的防护等领域得到了广泛应用^[1–4]. 负泊松比材料或结构在纵向受压时会横向收缩, 在纵向受拉时会横向膨胀^[5]. 与传统的结构相比,

负泊松比结构拥有特殊的力学性能和物理性能^[6–9]. 聚脲作为一种具有高强度、高韧性、耐冲击性等优越性能的超弹性高分子材料, 表现出很好的耐机械应力和迅速恢复变形的能力, 引起了研究者的广泛关注^[10,11].

张一帆^[12]通过数值仿真和试验的方法研究了星形、箭形两种负泊松比点阵结构在压缩载荷作用下几

引用格式: 黄秀峰, 张振华. 聚脲涂覆三维负泊松比点阵结构的静态力学性能研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 054601

Huang X F, Zhang Z H. Static mechanical properties of three-dimensional polyurea-coated lattice structures with negative Poisson's ratio (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 054601, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0180

何参数对弹性模量、剪切模量等力学指标的影响. Meza等人^[13]制造了纳米级陶瓷的点阵结构并进行了压缩试验,发现这些材料同时具有超轻、坚固和吸收能量的特性,同时在超过50%的压缩应变后可以恢复成原始形状. Zhang等人^[14]为了研究不同类型点阵材料的力学性能,通过采用微纳米制备技术并结合原位电镜测试对纳米级点阵结构进行了力学表征,结果表明这些点阵结构具有强度大、质量轻、变形能力强等优点. 敬霖等人^[15]重点关注了金属点阵夹芯结构的静、动态力学行为以及变形模式,认为动态载荷作用下与准静态力学行为下点阵结构的变形模式类似,并且认为点阵结构作为缓冲设备具有良好的应用前景. Ingrole等人^[16]利用增材制造方法制成内凹六边形负泊松比蜂窝结构模型,并进行了准静态压缩试验. 结果表明,内凹六边形负泊松比点阵结构的吸能能力比传统的点阵结构提高30%. 邹广平等人^[17]制作了以普通钢板为上下面板、聚氨酯弹性体为芯层的点阵夹层结构,通过SPS复合钢板的三点弯曲载荷试验发现该点阵夹芯结构会发生面芯分层、芯层剪切破坏等现象. 张谦^[18]结合数值仿真技术研究了在三点的弯曲试验下不同密度、截面尺寸的泡沫铝对碳纤维夹芯结构的承载能力、刚度、吸能效果的影响. 张弥等人^[19]对钛合金金字塔型点阵夹层结构进行弯曲力学性能试验研究,结合理论推导和数值仿真方法验证了试验结果的正确性. 结果表明,列数越多,边界条件的影响越小,点阵结构的承载能力越强. 高强等人^[20]以内凹六边形负泊松比结构为研究对象并实施三点弯曲试验,探讨了胞元结构参数对单位质量吸收能量的影响. Wang等人^[21]主要从力-位移曲线、弯曲强度和破坏模式三个方面比较了陶瓷蜂窝点阵结构与传统结构的弯曲性能,发现陶瓷蜂窝点阵结构具有更好的抗弯效果. 张青艳等人^[22]研究了有无聚脲包覆的混凝土在准静态压缩和动态压缩试验下的变形过程和吸能特性,发现包覆聚脲的混凝土在压缩载荷作用下的吸能效果显著提高. 许帅^[23]采用试验研究和数值模拟相结合的方法,研究了聚脲弹性体复合结构在耗能机制、破坏机制和速度效应等方面的抗冲击防护性能,结果表明涂覆聚脲的背板可以有效地阻止冲击破坏. Liu等人^[24]结合数值仿真方法研究了以聚脲为芯层的夹层结构在不同初始冲击速度下的抗侵彻性能,发现聚脲层增加了弹道阻力并具有明显的吸能效果,有效提高了夹层结构

的抗穿透能力.

目前,国内外学者对负泊松比结构的研究工作已经逐步开展,但结构类型较为单一,主要集中于构型较为简单的二维蜂窝结构. 爆炸冲击载荷作用下舰艇结构的防护问题一直是国防领域的热点问题. 本研究将目前力学和材料科学前沿领域的空间点阵结构、负泊松比结构和聚脲超弹性材料结合起来,以期达到更优的防护效能. 本文通过对四面内凹金字塔型的三维负泊松比点阵结构进行准静态压缩试验和弯曲试验研究,比较了有无聚脲涂覆对负泊松比点阵结构力学性能、吸能效果和变形模式的影响,为负泊松比点阵结构进一步的静态和动态力学性能研究提供支撑.

2 试验设计与方法

2.1 模型设计

本文研究对象为专利^[25]设计的点阵单胞结构改进形式,该点阵单胞结构由上、下面的8根方杆和内部的28根圆杆组成,如图1所示. 单胞结构尺寸为:方框边长 $B=25\text{ mm}$,高度 $H=28\text{ mm}$,总长 $W=31\text{ mm}$;杆件伸出长度 $a=1\text{ mm}$, $b=3\text{ mm}$,杆件厚度 $d=3\text{ mm}$;斜杆在 XY 平面的投影与 Y 轴的夹角 $\alpha=20^\circ$,斜杆在 XZ 平面的投影与 Z 轴的夹角 $\beta=50^\circ$.

单胞结构的相对密度 ρ^* 为杆件的实际体积 V^* 与单胞结构所占的空间体积 V 之比,如式(1)所示. 将单胞结构的尺寸参数带入,得到该型单胞结构的相对密度为0.125:

$$\rho^* = \frac{V^*}{V} = 0.125. \quad (1)$$

为从准静态压缩试验和弯曲试验两个方面研究该型负泊松比点阵结构的静态力学性能,本文将单胞排成不同的阵列的形式,如图2所示. 根据点阵结构在坐标轴 X , Y 和 Z 方向上所包含的单胞数量命名模型. 以图2(c)的模型为例,该点阵模型在坐标轴 X 方向上有8个单元结构,坐标轴 Y 方向上有1个单元结构,坐标轴 Z 方向上有3个单元结构,故该点阵模型称为813模型. 所以,图2(a)命名为313模型,图2(b)命名为333模型,单胞结构命名为111模型.

2.2 模型制作

由于本文所述的单胞结构微结构较多、尺寸较

图 1 (网络版彩图) 单胞结构图. (a) 整体示意图; (b) 正视图; (c) 俯视图

Figure 1 (Color online) Diagram of single-cell structure. (a) Overall view; (b) front view; (c) top view.

表 1 材料PC的性能参数

Table 1 Performance parameters of polycarbonate

性能	测试方法	指标
密度	ASTM D792 (ISO 1183, GB/T 1033)	1.18–1.20 (g/cm ³ at 21.5°C)
玻璃化转移温度	DSC, 10°C/min	113 (°C)
维卡软化温度	ASTM D1525 (ISO 306, GB/T 1633)	117 (°C)
熔融指数	260°C, 1.2 kg	6–8 (g/10 min)
分解温度	TGA, 20°C/min	>360 (°C)
杨氏模量(X-Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	2048±66 (MPa)
拉伸强度(X-Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	59.7±1.8 (MPa)
断裂伸长率(X-Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	12.2±1.4 (%)
弯曲模量	ASTM D790 (ISO 178, GB/T 9341)	2044±55 (MPa)
抗弯强度	ASTM D790 (ISO 178, GB/T 9341)	94.1±0.9 (MPa)
简支梁冲击强度	ASTM D256 (ISO 179, GB/T 1043)	25.1±1.9 (kJ/m ²)
拉伸强度(Z)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	29.1±4.1 (MPa)

图 2 模型示意图. (a) 313模型; (b) 333模型; (c) 813模型
Figure 2 Schematic diagram of model. (a) Model of 313; (b) model of 333; (c) model of 813.

小、构型较为复杂, 因此常规工艺难以加工. 为制备点阵结构, 采用增材制造方法^[26], 利用Raise3D Pro2型号的3D打印机和Polymaker公司的聚碳酸酯(PC)材料制作点阵模型. PC材料的具体性能参数见表1. 3D打印的基本步骤主要包括: 建立模型、导出模型、切片处理、实施打印、后处理加工. 首先, 结合AutoCAD和SolidWorks两种软件建立点阵结构模型, 并导出成STL格式文件. 其次, 输入到切片软件ideaMaker, 将其转换成3D打机器可识别的代码进行切片处理, 以熔融堆积成型(FDM)的方式将模型成型, 提前预览打印

过程中喷头的运动路径. 预览无误后, 实施打印. 打印结束后, 用砂纸、小刀等工具去掉多余的毛刺并将模型表面打磨光滑.

为研究涂覆聚脲对点阵结构力学性能的影响, 试验使用青岛爱尔佳公司Air⁺⁺1671型号的高性能聚脲防护材料, 采用完全浸泡的方式涂覆模型表面. Air⁺⁺1671型号聚脲的各项性能指标见表2. 试验之前, 根据GB/T23446-2009《喷涂聚脲防水涂料》国家标准, 所有涂覆聚脲的模型都在温度23°C、相对湿度50%的条件下自然干燥7 d以上. 制作好的点阵结构试验模型如表3所示.

2.3 试验方法

负泊松比点阵结构的静态试验研究分为准静态压缩试验和弯曲试验, 两种试验研究均采用MTS万能试验机, 试验加载速率5 mm/min. 111, 313, 333点阵模型用于准静态压缩试验研究, 813点阵模型用于弯曲试验研究. 每种点阵模型加工4个, 其中2个涂覆聚脲, 2个不涂覆聚脲, 模型编号如表4所示. 试验模型的编号方式是N-S, N, S分别代表点阵结构的类型和每一种点阵结构的序号, 可根据表4查询点阵结构的具体信息. 例如“313-1”表示涂覆聚脲厚度为4.80 mm的1号313点阵模型. 用于弯曲试验的813点阵模型又分为三点弯曲和四点弯曲两种加载方式, 其中813的1号模型用于涂覆聚脲的三点弯曲试验, 813的2号模型用于涂覆聚脲的四点弯曲试验, 813的3号模型用于不涂覆聚脲的三点弯曲试验, 813的4号模型用于不涂覆聚脲的四点弯曲试验.

表 3 负泊松比点阵结构类型

Table 3 Type of negative Poisson's ratio lattice structure

是否涂覆	点阵结构类型			
	111	313	333	813
无聚脲
有聚脲

表 2 Air⁺⁺1671型号聚脲的性能参数

Table 2 Performance parameters of Air⁺⁺1671 polyurea

序号	项目	指标
1	干燥时间 h (25°C, RH=60%)	表干 ≤ 2 , 实干 ≤ 24
2	拉伸强度 (MPa)	≥ 18
3	断裂伸长率 (%)	≥ 350
4	撕裂强度 (N/mm)	≥ 55
5	附着力 (MPa)	≥ 3.0
6	低温弯折性 (°C)	-40
7	不透水性 (1 MPa/24 h)	不透水
8	耐磨性 ((750 g/750 r)/mg)	≤ 20
9	耐老化	无明显变色、无开裂、无粉化

3 试验结果与分析

3.1 准静态压缩试验

试验前通过MTS万能试验机测试系统调节压缩头, 将其与点阵结构的上下表面无缝隙接触, 利用传感器将测试系统与电脑相连, 并全程拍摄录像.

3.1.1 应力-应变曲线分析

根据MTS万能试验机记录的载荷和位移数据, 得到不同点阵结构的宏观应力-应变曲线, 如图3-5所示. 通过应力-应变曲线的曲率变化来判断结构的力学行为变化^[27,28]. 图3给出了111试样的压缩力学曲线, 其中涂覆聚脲的111-1号和111-2号点阵结构的应力-应变曲

表 4 模型的聚脲厚度

Table 4 Polyurea thickness of model

点阵模型	序号	厚度 (mm)	序号	厚度 (mm)
111	1	2.55	3	0
	2	2.59	4	0
313	1	4.8	3	0
	2	4.88	4	0
333	1	3.22	3	0
	2	4.18	4	0
813	1	3.18	3	0
	2	2.43	4	0

图 3 (网络版彩图) 111模型宏观应力-应变曲线

Figure 3 (Color online) Macro stress-strain curve of 111 model.

线可分为三个阶段: 初始密实阶段 I、弹性变形阶段 II 和破坏阶段 III。在初始密实阶段 I, PC材料打印的内部结构与外层包覆的聚脲之间存在微小孔隙, 这些孔隙在外界施加作用力的时候开始闭合, 应力随着应变的增加缓慢增大, 此时的应变范围处于 0–0.05。随着作用力的增大, 111-1 号和 111-2 号模型的变形从初始密实阶段 I 转为弹性变形阶段 II, 此时应力-应变之间基本成线性关系, 应变范围区间为 0.05–0.15。当达到压缩强度极限 0.5 MPa 之后, 涂覆聚脲的 111-1 号和 111-2 号点阵结构开始发生破坏, 应变在增大, 承载力在减小。由于包覆聚脲的存在, 直至破坏的后期阶段 III, 包覆聚脲的点阵结构仍然可以承受一定的压缩载荷。当应变变形分别达到 0.23 和 0.28 时, 涂覆聚脲的 111 模型仍然能够承受 0.28 MPa 左右的应力, 最终聚脲发生撕裂破坏时, 整个点阵结构失去承载力。

图 3 还给出了无聚脲 111 试件的应力-应变曲线,

111-3 号和 111-4 号点阵结构的准静态应力-应变曲线可分为两个阶段: 弹性变形阶段和破坏阶段。当应变在 0–0.075 时, 应力随着应变的增大而增加, 此时的点阵结构表现的是弹性变形, 111-3 号模型的弹性压缩强度极限是 0.42 MPa, 111-4 的弹性压缩强度极限是 0.52 MPa。当达到峰值之后, 应力呈现下降趋势, 开始进入破坏阶段, 其中 111-3 号试样由于 PC 材料打印存在的缺陷而导致曲线出现陡降的现象。最终, 111-3 号试样完全破坏时的最终应变为 0.14, 破坏强度为 0.21 MPa, 111-4 号试样的应变为 0.15 时完全破坏, 破坏强度为 0.26 MPa。

图 4 给出了 313 试样的压缩力学曲线, 其中涂覆聚脲的 313-1 号和 313-2 号点阵结构的准静态压缩试验可分为四个阶段: 初始密实阶段 I、弹性变形阶段 II、应力平台阶段 III 和密实化阶段 IV。在初始密实阶段 I, PC 材料打印的 313 模型与外层包覆的聚脲之间存在微小孔隙, 这些孔隙在外界施加作用力的时候开始闭合, 应力随着应变的增加缓慢增大, 此时的应变范围大约处于 0–0.018, 持续时间较短。随着加载力的增加, 313-1 号和 313-2 号模型的变形从初始密实阶段 I 转为弹性变形阶段 II, 此时应力-应变之间基本成线性关系, 当应变约为 0.1 时达到峰值应力 1.18 MPa 左右。继续加载时, 由于斜杆发生塑性坍塌, 313-1 号和 313-2 号试样第一层的点阵结构被压溃, 应力-应变曲线突然下降。第一层点阵结构的水平方杆因压头的压缩与下部结构相接触, 导致应力-应变曲线缓慢上升, 当第一层结构被完全压溃后, 压头推动已经被压溃的第一层结构与第二层结构开始接触, 应力-应变曲线再次缓慢上升。之后, 313-1 号和 313-2 号点阵结构逐层被压溃, 应力-应变曲线产生屈服流动, 呈现出较长的应力平台。应力平台阶段 III 的应变范围约在 0.1–0.5, 这个过程点阵结构吸收了能量。当应力继续增加到初始应力峰值时, 313-1 号和 313-2 号点阵结构的内部空间逐渐被完全挤压, 点阵结构进入最终的密实化阶段 IV。密实化阶段 IV 与初始密实阶段 I 相比, 应力会随着应变的增加而迅速增大。

图 4 还给出了无聚脲 313 试件的应力-应变曲线, 313-3 号和 313-4 号点阵结构的准静态压缩试验过程可分为两个阶段: 弹性变形阶段和破坏阶段。当应变在 0–0.075 时, 应力随着应变的增大而增加, 此时的点阵结构表现的是弹性变形, 313-3 号和 313-4 号点阵结构的弹性压缩强度极限是 0.52 MPa。当达到峰值之后, 应

力下降, 开始进入破坏阶段. 313-3号和313-4号试样的杆件出现裂缝, 随着杆件的裂痕迅速扩大, 应力-应变曲线出现多次陡降. 最终, 313-3号试样在应变为0.08时完全破坏, 破坏强度为0.20 MPa. 313-4号试样在应变为0.07时完全破坏, 破坏强度为0.18 MPa. 对比有无聚脲涂覆313点阵结构的应力-应变曲线可以看出, 涂覆聚脲对整个点阵结构的承载能力、变形能力等方面都有很大的提高.

图5给出了333试样的压缩力学曲线, 其中涂覆聚脲的333-1号和333-2号点阵结构的准静态压缩试验也可分为四个阶段: 初始密实阶段 I、弹性变形阶段 II、应力平台阶段 III 和密实化阶段 IV. 在压缩加载的初始密实阶段 I, PC材料打印的333模型与外层包覆的聚脲之间存在微小孔隙, 应变范围约为0-0.006.

图 4 (网络版彩图) 313模型宏观应力-应变曲线
Figure 4 (Color online) Macro stress-strain curve of 313 model.

图 5 (网络版彩图) 333模型宏观应力-应变曲线
Figure 5 (Color online) Macro stress-strain curve of 333 model.

相比较313模型, 涂覆聚脲的333模型的初始密实阶段 I 更短. 随着加载力的增加, 333-1号和333-2号模型也进入弹性变形阶段 II, 在应变约为0.08时达到第一个峰值应力, 约为0.75 MPa. 与313模型相类似, 继续加载时, 333-1号和333-2号试样也会逐层压溃, 但最终失效时的应力、应变值有所减小.

图5还给出了无聚脲333试件的应力-应变曲线, 333-3号和333-4号点阵结构的准静态压缩试验过程也可分为两个阶段: 弹性变形阶段和破坏阶段. 当应变约在0-0.037时, 应力随着应变的增加而增大, 313-3号和313-4号点阵结构的弹性压缩强度极限分别是0.32和0.38 MPa. 达到峰值之后, 点阵结构进入破坏阶段, 曲线呈现出下降趋势. 由于333模型的单元数量多于313模型的单元数量, 各个单元的失效时刻不一致, 333-3号和333-4号模型的应力-应变曲线的锯齿状波动明显多于313模型. 最终, 333-3号试样在应变为0.063时完全破坏, 破坏强度为0.13 MPa. 333-4号试样在应变为0.057时完全破坏, 破坏强度为0.18 MPa. 从333点阵结构的应力-应变曲线可以看出, 未涂覆聚脲的点阵结构在承载能力、变形能力等方面相对较弱.

通过以上应力-应变曲线的分析, 可以看出不同类型点阵结构表现出的力学性能是不一样的. 表5中用特征强度、延伸率来表征点阵结构的力学性能, 未涂覆聚脲结构的特征强度是弹性极限强度, 涂覆聚脲结构的特征强度是平台应力, 平台应力可由式(2)计算. 特征强度越大说明结构的承载能力更强, 断裂应变越大说明结构的塑性变形越大. 从表5可以看出涂覆聚脲的点阵结构的特征强度、断裂应变明显大于对应的未涂覆试样, 这说明涂覆聚脲对点阵结构力学性能的提升具有一定效果.

$$\sigma_s = \frac{1}{\varepsilon_d - \varepsilon_s} \int_{\varepsilon_s}^{\varepsilon_d} \sigma d\varepsilon, \quad (2)$$

其中, ε_s 为屈服应变, 即应力平台阶段的起始应变; ε_d 为锁定应变, 应力平台阶段与密实化阶段的分界点应变, 即密实化阶段中与初始峰值应力对应的应变; σ 为随着应变而变化的应力.

3.1.2 吸能特性分析

本文采用总吸能 E 、单位体积变形能 EPV 、比吸能 SEA 、能量吸收效率 η 、压缩利用率 λ 来综合评价有无聚脲情况下不同类型点阵结构的能量吸收特

表 5 点阵结构的力学性能参数

Table 5 Mechanical property parameters of lattice structure

点阵结构	特征强度 (MPa)	断裂应变	点阵结构	特征强度 (MPa)	断裂应变
111-1	0.5	0.24	111-3	0.42	0.14
111-2	0.52	0.3	111-4	0.52	0.15
313-1	0.83	0.8	313-3	0.52	0.08
313-2	0.95	0.8	313-4	0.53	0.07
333-1	0.51	0.7	333-3	0.32	0.06
333-2	0.64	0.67	333-4	0.38	0.06

性^[29-31].

总吸能 E (total energy absorption), 即在准静态压缩试验下, 点阵结构载荷-位移曲线所围成的面积:

$$E = \int_0^s F ds. \quad (3)$$

单位体积变形能 EPV (deformation energy per unit volume), 又叫做应变能密度, 在准静态压缩试验下, 点阵结构吸收的能量与体积之比, 即应力-应变曲线所围成的面积:

$$EPV = \frac{E}{V} = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon. \quad (4)$$

比吸能 SEA (specific energy absorption), 即在准静态压缩试验下, 点阵结构吸收的能量与质量之比:

$$SEA = \frac{\int_0^s F ds}{m}. \quad (5)$$

能量吸收效率 η , 即在准静态压缩试验下, 某一压缩应变下点阵结构所吸收的能量与该压缩应变下对应应力的比值:

$$\eta = \frac{\int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon}{\sigma}. \quad (6)$$

压缩利用率 λ , 即在准静态压缩试验下, 点阵结构达到最终的密实化阶段前的压缩位移与总厚度之比 (无密实化阶段的点阵结构用断裂应变表示压缩利用率):

$$\lambda = \frac{\Delta H}{H}. \quad (7)$$

根据MTS万能试验机得到的压缩力学曲线, 计算111, 313, 333不同类型点阵结构在准静态压缩试验条件下的吸能特性结果, 如表6所示.

(1) 总吸能分析

总吸能可以用来分析点阵结构吸收能量的特性, 图6给出了不同类型点阵结构下压缩试验的吸能效果. 从有无涂覆聚脲的角度来看, 涂覆聚脲的111-1号和111-2号试样吸收的能量是未涂覆聚脲的111-3号和111-4号试样的1.6倍, 涂覆聚脲的313-1号和313-2号点阵结构吸收的能量是未涂覆聚脲的313-3号和313-4号点阵结构的51倍, 涂覆聚脲的333-1号和333-2号点阵结构吸收的能量是未涂覆聚脲的333-3号和333-4号点阵结构的43倍. 所以, 涂覆聚脲比不涂覆聚脲的点阵结构在吸收能量方面有显著优势. 从点阵结构的类型来看, 点阵结构的总吸能随着单元数量的增加而逐步增加.

(2) 单位体积变形能和比吸能分析

点阵结构的设计可从空间利用率和轻量化两个方面考虑, 图7的单位体积变形能反映点阵结构在相同体积情况下能量吸收的大小, 图8的比吸能反映同等质量下点阵结构的吸能大小. 从图7可以看出, 涂覆聚脲的单胞比未涂覆聚脲的单胞在单位体积变形能方面的增幅较小, 而涂覆聚脲的313和333点阵结构的单位体积变形能明显大于未涂覆聚脲的313和333点阵结构, 这说明排成阵列的点阵结构比单胞结构在单位体积变形能方面会有较大的提升. 比较图7与8可以看出, 不同类型点阵结构的比吸能与单位体积变形能的变化趋势是一致的. 未涂覆聚脲的点阵结构随着单元数量的增加, 单元体积变形能和比吸能在逐渐递减. 同时, 在涂覆聚脲情况下, 333模型的单元数量虽然多于313模型, 但是由于333模型涂覆聚脲的厚度小于313模型, 333模型的单位体积变形能和比吸能小于313模型. 这说明涂覆聚脲对点阵结构的单位体积变形能和比吸能影响更大, 对点阵结构吸能效果的提升更加明显.

表 6 点阵结构吸能特性的计算结果

Table 6 Energy absorption calculation results of lattice structure

结构类型	总吸能 E (J)	单位体积变形能 EPV (J/cm^3)	比吸能 SEA (J/g)	最大能量吸收效率 η (%)	压缩利用率 λ (%)
111-1	1.82	0.067	0.32	27.12	24.20
111-2	2.40	0.089	0.42	33.93	29.68
111-3	1.09	0.040	0.29	19.65	14.20
111-4	1.60	0.060	0.43	22.73	15.35
313-1	293.92	1.307	4.77	39.01	49.15
313-2	305.34	1.358	4.89	36.33	44.14
313-3	6.42	0.029	0.23	13.92	8.42
313-4	5.32	0.024	0.19	12.84	7.04
333-1	338.88	0.502	2.39	40.59	55.15
333-2	374.03	0.554	2.35	37.41	43.98
333-3	8.57	0.013	0.11	10.07	6.34
333-4	8.15	0.012	0.11	6.79	5.68

图 6 (网络版彩图)总吸能
Figure 6 (Color online) Total energy absorption.

图 7 (网络版彩图)单位体积变形能
Figure 7 (Color online) Deformation energy per unit volume.

(3) 能量吸收效率分析

同一承载能力情况下, 能量吸收效率越高, 结构能够吸收更多的能量. 从图9给出的不同类型点阵结构最大能量吸收效率可以看出, 涂覆聚脲后的点阵结构能量吸收效率也是明显大于未涂覆聚脲的点阵结构, 点阵结构未涂覆聚脲时的最大能量吸收效率会随着单元数量的增加而减少.

从图10(a)–(c)可以看出不同类型点阵结构能量吸收效率随应力的变化趋势. 图10(a)中111模型能量吸收效率变化曲线可以分为两个阶段: 上升阶段 I 和上升

阶段 II. 在上升阶段 I, 111试样处于初始密实和弹性变形阶段, 随着应力的增加能量吸收效率增长很快, 达到5%左右. 上升阶段 II 对应的是111试样的破坏阶段, 结构的承载能力在减小, 能量吸收效率迅速增大到最高点, 但此时111结构已经发生破坏.

图10(b)涂覆聚脲的313-1号和313-2号点阵结构的能量吸收效率变化曲线可以分为4个阶段: 上升阶段 I、上升阶段 II、下降阶段 III、下降区 IV. 在上升阶段 I, 313-1号和313-2号点阵结构在加载初期处于初始密实和弹性变形阶段, 能量吸收效率会随着应力

图 8 (网络版彩图)比吸能
Figure 8 (Color online) Specific energy absorption.

图 9 (网络版彩图)能量吸收效率最大值
Figure 9 (Color online) Maximum energy absorption efficiency.

的增加而增大. 在上升阶段 II, 313-1 号和 313-2 号点阵结构进入应力平台阶段, 应力值保持在 1 MPa 左右, 能量吸收效率从 5% 大幅增长到 36% 左右, 这个阶段的 313-1 号和 313-2 号点阵结构吸收了绝大部分能量. 当到达下降阶段 III, 313-1 号和 313-2 号点阵结构的能量吸收效率开始随着应力的增加而减小, 结构从应力平台阶段过渡到最终的密实化阶段. 下降阶段 IV 表明, 处于密实化状态的 313-1 号和 313-2 号点阵结构的能量吸收效率会迅速下降, 结构即将被压溃. 图 10(b) 未涂覆聚脲的 313-3 号和 313-4 号能量吸收效率变化规律与 111 结构相同, 可分为两个阶段: 上升阶段 I 和上升阶段 II.

图 10 (网络版彩图)能量吸收效率. (a) 111 模型; (b) 313 模型; (c) 333 模型

Figure 10 (Color online) Energy absorption efficiency. (a) Model of 111; (b) model of 313; (c) model of 333.

图 10(c) 涂覆聚脲的 333-1 号和 333-2 号点阵结构的能量吸收效率变化曲线可以分为 6 个阶段: 上升阶段 I、上升阶段 II、平台阶段 III、上升阶段 IV、下降阶段 V、下降阶段 VI. 在上升阶段 I, 333-1 号和 333-2 号点阵结构的能量吸收效率在加载初期会随着应力的增加而增大. 上升阶段 II、平台阶段 III 和上升阶

段Ⅳ都属于应力平台阶段, 上升阶段Ⅱ到平台阶段Ⅲ对应图5宏观应力-应变曲线的第一个应力峰值到第二个应力峰值之间, 能量吸收效率在逐渐增加, 上升阶段Ⅳ的能量吸收效率从13%快速增长到36%左右, 阶段Ⅱ到阶段Ⅳ的333-1号和333-2号点阵结构吸收了大部分的能量. 在下降阶段Ⅴ, 结构逐渐过渡到最终的密实化阶段, 能量吸收效率随着应力的增加而减小, 但下降速度较缓. 当处于下降阶段Ⅵ时, 333-1号和333-2号点阵结构进入密实化阶段, 能量吸收效率下降, 结构即将被压溃. 图10(c)未涂覆聚脲的333-3号和333-4能量吸收效率变化规律与111结构相同, 也可分为上升阶段Ⅰ和上升阶段Ⅱ.

从图10不同结构的能量吸收效率曲线可以看出, 111结构以及未涂覆聚脲的313-3号、313-4号、333-3号、333-4号点阵结构的能量吸收效率曲线变化趋势是相同的, 能量吸收效率在破坏阶段增加较快. 涂覆聚脲的313-1号、313-2号、333-1号和333-2号点阵结构的能量吸收效率曲线变化规律较一致, 在屈服阶段吸收了能量, 吸收效率也随之迅速提高, 达到35%以上. 这说明, 涂覆聚脲后的点阵结构具有较强的能量吸收性能.

(4) 压缩利用率分析

压缩利用率可以用来表征点阵结构在准静态压缩试验下吸收能量的利用率, 图11给出了不同类型点阵结构的压缩利用率. 涂覆聚脲的313和333号点阵结构压缩利用率基本持平, 大致在50%左右, 333-1号点阵结构的压缩利用率最大, 压缩利用率为55.15%. 对于未涂覆聚脲的点阵结构, 压缩利用率会随着单元数量的增加而减少, 333-4号点阵结构的压缩利用率最小, 压缩利用率为5.68%. 相比较未涂覆聚脲的点阵结构, 点阵结构在涂覆聚脲后的压缩利用率更大, 这说明点阵结构的压缩位移行程越大, 吸收的能量更多, 点阵结构可以起到更好的缓冲防护作用.

3.1.3 破坏模式分析

(1) 111破坏模式分析

压缩载荷作用下, 无聚脲涂覆的111-3和111-4模型四周显著内凹, 呈现出明显的负泊松比效应. 在结构破坏时会发生节点断裂, 如表7所示. 由于斜杆与金字塔顶点以及水平方杆的交接处应力值较大, 所以断裂裂

图 11 (网络版彩图) 压缩利用率

Figure 11 (Color online) Compression utilization.

痕主要集中于斜杆的两端. 观察破坏后的单胞结构发现, 由于单元杆件的断裂破坏位置不完全对称, 四周的端部杆件会存在一定程度的侧倾, 这主要是由于实际打印时材料PC可能存在的缺陷而导致. 以上特征表明, 斜杆会在弯曲力和轴向压缩力的同时作用下首先发生破坏, 造成整个点阵单胞结构承载能力的丧失. 涂覆聚脲的111-1和111-2结构的破坏模式相类似, 也会出现端部侧倾、位置不对称的现象, 而由于外层聚脲的包覆未能观察到内部杆件的破坏, 但可以看出涂覆聚脲后结构的压缩应变更大, 压缩造成的负泊松比效果更为明显.

(2) 313破坏模式分析

压缩载荷作用下, 313结构的破坏形态与111结构有较大的区别, 如表7所示. 无聚脲涂覆的313-3和313-4结构的第二层芯层破坏情况较严重, 多根斜杆在端部发生断裂破坏, 胞元之间的连接杆发生弯曲变形, 端部杆件出现不规则的侧倾. 第一层、第三层芯层在杆件交汇处也出现了断裂裂纹, 但破坏程度相较于第二层芯层小. 以上的特征表明, 313点阵结构在压缩力的作用下发生破坏, 主要是由于斜杆两端的应力超过承载极限导致整个点阵结构承载能力的丧失, 也造成了点阵结构的压缩利用率降低. 涂覆聚脲的313-1和313-2结构对应着应力-应变曲线的密实化阶段, 在最终破坏时几乎被完全压实, 由于外层包裹的聚脲带动结构中的杆件被充分压缩, 提高了点阵结构的压缩利用率, 增大了点阵结构吸收的能量.

表 7 (网络版彩图)点阵结构最终的压缩破坏图像

Table 7 (Color online) Final compression failure image of lattice structure

类型	111-1	111-2	111-3	111-4
破坏模式
类型	313-1	313-2	313-3	313-4
破坏模式
类型	333-1	333-2	333-3	333-4
破坏模式

(3) 333破坏模式分析

压缩载荷作用下, 333结构的破坏模式见表7, 模型上标记的黑点用来确定拍摄角度. 无聚脲涂覆的333-3和333-4结构的破坏主要集中于第一层芯层斜杆的两端, 第二、三层的芯层结构较完整. 这是由于应力集中的影响, 在斜杆与边框的连接处, 斜杆与端部杆件交接处, 杆件端部在弯矩应力和压缩应力的联合作用下, 容易发生错位和断裂的情况. 同时, 上面板与第一层芯层的黏结强度较大, 胞元杆件的两端会发生剪切变形, 所以第一层芯层的破坏更加明显. 试验结束后可以发现, 面板与芯层在结构破坏时并未出现脱落现象, 面板没有发生明显变形. 涂覆聚脲的333-1和333-2结构在最终破坏时几乎被完全压实, 但比未涂覆聚脲的333-3和333-4结构的压缩利用率更高. 密实化最终阶段的部分杆件撑破外层包裹的聚脲, 面板与芯层之间也没有脱落.

表8给出了涂覆聚脲点阵结构断口的微观特征, 聚脲涂层与基材PC的接触面有清晰的纹路. 这是由于采用熔融成积的增材制造方法, 基材通过一层一层堆积形成完整的点阵结构, 所以可以看到基材PC的微观图

有白色痕迹, 而附着在基材PC上的聚脲涂层在受外界力的挤压作用时, 这种纹路印迹更加清晰.

3.2 弯曲试验

813点阵夹层结构的长(L)、高(h)尺寸为248 mm $\times$ 78 mm. 两端用螺栓固定在设计好的模具上, 如图12所示. 上、下面板采用厚度 $c=2$ mm的Q235钢板与芯层相黏结, 如图13所示. 采用MTS万能试验机对813点阵夹层结构分别实施两端固支的三点弯曲试验和四点弯曲试验. 弯曲试验模型分为涂聚脲与不涂聚脲两种涂覆状态, 对应的试验工况如表9所示.

通过施加线力夹具对模型施加弯曲载荷, 三点弯曲试验中夹具对准813点阵夹层结构的上面板中线, 如图14(a)所示. 上、下面板对称布置8个单向电阻应变片, 标号如图13(a)所示, 并用DHAHS动态应变测试仪测试应变信号, 采集频率为10 Hz. 同时用Panasonic激光位移传感器对准下面板的中心位置, 测量试验模型下面板中心的位移变化, 采集频率为10 Hz. 四点弯曲试验中夹具以跨距80 mm, 上面板中线为对称线的方式加载模型, 如图14(b)所示. 上、下面板共布置7个

表 8 (网络版彩图)聚脲涂层断口微观形貌

Table 8 (Color online) Fracture micro-morphology of structures with polyurea

示意简图	基材 PC 微观图	聚脲涂层与基材 PC 接触面	聚脲涂层微观图

图 12 弯曲试验模型示意图. (a) 三点弯曲; (b) 四点弯曲
Figure 12 Schematic diagram of bending experimental model. (a) Three-point bending; (b) four-point bending.

单向电阻应变片, 标号如图13(b)所示, 并用DHAHS动态应变测试仪测试应变信号, 下面板中心点的位移也用Panasonic激光位移传感器测量, 采集频率均为10 Hz.

3.2.1 加载端部的载荷-位移曲线分析

根据弯曲试验得到不同工况下813点阵夹层结构的载荷-位移曲线, 如图15所示. 涂覆聚脲模型的载荷-位移曲线可分为三个阶段: 弹性变形阶段、塑性屈服阶段、强化阶段. 在弹性变形阶段, 涂覆聚脲的813-1和813-2号模型承受的载荷基本上随着位移的增加而递增, 四点弯曲加载方式下813-2号模型的载荷相比较三点弯曲加载方式下813-1号模型的载荷增长得更快.

当813-1号模型的加载位移为10.64 mm时, 试样所承受的载荷有一段短暂的下降, 从2.79减少到2.46 kN, 这是由于PC材料打印存在的缺陷, 很快载荷又随着位移的增加而增大. 当813-1号点阵结构的加载位移增大到16.53 mm, 813-2号点阵结构的加载位移增大到14.96 mm时, 点阵结构的位移在增加但载荷的变化幅度较小, 此时试样进入塑性屈服阶段. 当813-1号试样的加载位移继续增大到17.26 mm, 813-2号试样的加载位移继续增大到17.17 mm时, 点阵结构进入强化阶段, 载荷随着位移的增加呈线性增加, 且斜率大于弹性阶段的载荷-位移曲线, 此时由于夹芯层已经失效, 因而主要是上面板在抵抗压头作用力.

无聚脲涂覆的载荷-位移曲线也可分为弹性阶段、塑性屈服、强化阶段三个阶段, 其中813-3号试样的塑性屈服段夹具位移在15.21–18.17 mm之间, 813-4号试样的塑性屈服阶段夹具位移在13.30–16.68 mm之间, 813-4号试样的载荷-位移曲线在屈服阶段出现一段小幅下降. 从加载的方式可以看出, 相同位移下四点弯曲的813-2号、813-4号试样所能承受的载荷明显大于三点弯曲的813-1号、813-3号试样.

通过对以上不同工况下813点阵结构载荷-位移曲线的分析, 可以看出涂覆聚脲对点阵结构弯曲力学性能的提升主要集中于弹性变形阶段和塑性屈服阶段, 强化阶段的载荷主要是由上面板在承担, 最终失效载荷均为22.25 kN. 相同的位移下试样四点弯曲工况下所能承受的载荷力明显大于三点弯曲工况, 但试样在三点弯曲工况下吸收的能量大于四点弯曲工况下吸收的能量. 表10给出了813点阵夹层结构的屈服载荷、屈服位移和总吸能.

图 13 上、下面板布置图. (a) 三点弯曲; (b) 四点弯曲
Figure 13 Layout of upper and lower panel. (a) Three-point bending; (b) four-point bending.

3.2.2 应变分析

根据弯曲试验电阻式单向应变片得到的应变时程曲线, 可以分析813点阵夹层结构在不同位置的拉、压状态. 图16分别给出了三点弯曲加载方式下涂覆聚脲和未涂覆聚脲试样的应变-时间曲线, 上、下面板共布置8个电阻式应变片, 其中1#和7#应变片、3#和5#应变片分别对称布置在上面板, 2#和8#应变片、4#和6#应

表 9 813模型试验工况

Table 9 Experimental condition of 813 model

编号	涂覆情况	工况
813-1	有聚脲	三点弯曲
813-2	有聚脲	四点弯曲
813-3	无聚脲	三点弯曲
813-4	无聚脲	四点弯曲

图 14 (网络版彩图)弯曲试验示意图. (a) 三点弯曲试验加载; (b) 四点弯曲试验加载
Figure 14 (Color online) Schematic diagram of bending experiment. (a) Three-point bending experiment loading; (b) four-point bending experiment loading.

图 15 (网络版彩图)载荷-位移曲线
Figure 15 (Color online) Load-displacement curve.

表 10 813点阵夹层结构试验数据

Table 10 Experimental data of 813 lattice sandwich structure

点阵结构型号	屈服载荷 (kN)	屈服位移 (mm)	总吸能 (J)
813-1 (有聚脲三点弯曲)	3.59	16.53	360.13
813-2 (有聚脲四点弯曲)	4.43	14.96	243.91
813-3 (无聚脲三点弯曲)	2.85	15.21	341.75
813-4 (无聚脲四点弯曲)	2.98	13.30	237.01

图 16 (网络版彩图)三点弯曲下夹层结构的面板应变时程. (a) 未涂覆聚脲模型; (b) 涂覆聚脲模型

Figure 16 (Color online) Strain time-history curve of panel with sandwich structure under three-point bending. (a) Model without polyurea coated; (b) model with polyurea coated.

变片分别对称布置在下面板. 从图16(a)和(b)的三点弯曲加载方式下试样的应变历时曲线可以看出, 无论是否涂覆聚脲, 各点应变的变化趋势是一致的. 其中, 1#和7#位置的应变先上升后下降, 并且始终大于0, 一直处于受拉状态. 3#和5#位置的应变先下降后上升, 并且应变先小于0后增加至大于0, 即先处于受压状态后处于受拉状态. 2#和8#位置的应变始终大于0, 一直处于受拉状态. 接近破坏时, 各点的应变值趋于稳定. 当弯曲试验结束并停止加载时, 上面板1#和7#, 3#和5#位置的应变减小但仍大于0, 下面板2#和8#位置的应变增加, 4#和6#位置的应变减小但仍大于0.

加载过程中, 模型上、下面板主要承受拉伸和弯曲载荷的联合作用. 上面板的3#和5#靠近加载端, 在初始加载阶段, 载荷作用造成的弯曲压应变大于固定端力作用的拉伸应变, 所以初始阶段会下降并且应变小于0, 呈现受压状态. 随着载荷的提升, 固定端作用的拉伸应变大于压头作用造成的弯曲压应变, 所以3#和5#位置的应变又会逐渐增加直至大于0, 呈现受拉状态. 由于上面板的1#和7#靠近螺栓固定端, 固定端

产生的拉伸应变大于压头造成的弯曲压应变. 随着载荷的提升, 拉伸效果越来越明显, 所以1#和7#位置的应变一直在增加, 处于受拉状态. 下面板的2#和8#、4#和6#在加载过程中受到弯曲拉应力和拉伸应力的联合作用, 始终处于受拉状态, 所以2#和8#, 4#和6#位置的应变一直大于0, 但是4#和6#位置的应变总体上大于2#和8#位置的应变.

图17分别给出了四点弯曲加载方式下涂覆聚脲和未涂覆聚脲试样的应变-时间曲线, 上、下面板共布置7个电阻式应变片, 其中1#和5#应变片、3#应变片分别对称布置在上面板, 2#和8#应变片、4#和6#应变片分别对称布置在下面板, 其中无聚脲涂覆试样只获得2#, 3#, 4#, 5#和6#位置的有效数据. 从图17(a)和(b)四点弯曲加载方式下试样的应变历时曲线可以看出, 无论是否涂覆聚脲, 各点应变的变化趋势是一致的. 1#和5#位置的应变始终大于0, 一直处于受拉状态. 3#位置的应变先下降后上升, 并且应变先小于0后大于0, 即先处于受压状态后处于受拉状态. 2#和8#位置的应变始终大于0, 一直处于受拉状态. 4#和6#处于受拉状态, 应

图 17 (网络版彩图)四点弯曲下夹层结构的面板应变时程. (a) 未涂覆聚脲模型; (b) 涂覆聚脲模型

Figure 17 (Color online) Strain time-history curve of panel with sandwich structure under four-point bending. (a) Model without polyurea coated; (b) model with polyurea coated.

变始终大于0并且大于2#和8#位置的应变. 当弯曲试验结束并停止加载时, 上面板1#, 3#和5#位置的应变减小但仍大于0, 下面板2#和8#位置的应变增加, 4#和6#位置的应变减小但仍大于0.

上面板的3#靠近加载端, 在初始加载阶段, 载荷作用造成的弯曲压应变大于固定端力作用的拉伸应变, 所以初始阶段会下降并且应变小于0, 即呈现受压状态. 随着载荷的提升, 固定端作用的拉伸应变大于压头作用造成的弯曲压应变, 所以3#位置的应变又会逐渐增加直至大于0, 呈现受拉状态. 对比图16和17可知, 四点弯曲试验的3#相较于三点弯曲试验的3#(5#), 受压状态的持续时间更长. 由于上面板的1#和5#靠近螺栓固定端, 固定端产生的拉伸应变大于压头造成的弯曲压应变. 随着载荷的提升, 拉伸效果越来越明显, 所以1#和5#位置的应变一直在增加, 处于受拉状态. 下面板的2#和8#, 4#和6#在加载过程中受到弯曲拉应力和拉伸应力的组合作用, 且2#和8#, 4#和6#位置的应变一直大于0, 但是4#和6#位置的应变总体上大于2#和8#位置的应变.

从以上的分析可知, 上、下面板各位置的应力应变状态由拉伸和弯曲两种组合变形决定. 涂覆聚脲的点阵结构的应变时程曲线相较未涂覆聚脲的点阵结构更加光滑, 并且可吸收更多的能量.

3.2.3 下面板中心位移分析

不同工况下813点阵夹层结构下面板中心位移时程曲线, 如图18所示. 涂覆聚脲试样的下面板中心位移

图 18 (网络版彩图)下面板中心位移时程曲线

Figure 18 (Color online) Displacement time-history curve at the center of lower panel.

随着时间的增加而增大, 在175–225 s之间对应的是塑性屈服阶段, 位移量的变化幅度较小. 未涂覆聚脲试样的下面板中心位移随着时间呈现波动式上升, 中间出现位移下降现象代表芯层内部的杆件出现断裂, 最终未涂覆聚脲试样的位移变形量小于涂覆聚脲的试样. 从加载方式来看, 三点弯曲的试样下面板中心的最终位移量大于四点弯曲加载的试样, 试验结果显示, 813-1, 813-2, 813-3, 813-4点阵结构下面板中心的最大位移分别为18.18, 15.98, 12.80和13.36 mm. 当停止加载后, 813点阵夹层结构的下面板中心位移会出现一定程度的下降, 这主要是由于在局部载荷的作用下, 上面板以及周围部分芯层已经受到破坏, 而下面板周围的结构

体并未被破坏, 夹层结构仍然具有强度且有恢复成原始状态的趋势, 但不能完全恢复.

3.2.4 破坏模式分析

对于813点阵夹层结构, 在三点弯曲载荷作用下, 观察到芯层出现局部压溃的现象^[32,33], 如表11所示. 弯曲试验中, 靠近压头作用的部位, 芯层的剪力变化最大, 最容易发生破坏, 所以第一层靠近加载处的部分单胞几乎完全被压溃. 当压缩载荷通过芯层传递时, 载荷的作用效果会逐层递减, 所以芯层第二层的破坏程度相较于第一层更小, 而第三层的变形则更小. 上面板最终呈现“V”型的弯曲变形, 下面板呈现下凹的弧形变形, 而芯层涂覆聚脲时, 下面板变形大于无聚脲涂覆的下面板. 无聚脲涂覆的点阵结构在破坏时, 个别胞元之间的连杆出现断裂, 部分胞元被压碎. 涂覆聚脲的点阵结构在被破坏时, 部分杆件撑破聚脲裸露出来但并未被压碎. 所以, 三点弯曲载荷作用下涂覆聚脲的点阵结构表现出更好的力学性能. 在四点弯曲载荷作用下, 813点阵夹层结构的芯层也出现局部压溃的现象, 但上面板呈现“U”型的弯曲变形, 下面板呈现下凹的弧形变形. 与三点弯曲类似, 涂覆聚脲模型的下面板变形大于无聚脲涂覆的下面板变形, 但四点弯曲加载时, 点阵结构的失效范围略大于三点弯曲加载模型.

根据对三点弯曲和四点弯曲试验的分析, 可知813点阵夹层结构在承受弯曲载荷时会在芯层中产生压应

力. 随着弯曲载荷的增加, 芯层的变形也在逐渐增大. 当压应力大于芯层的压缩强度, 则会由于面板的弯曲引起芯层的压溃.

4 结论

利用Raise3D Pro2打印机制作了以PC为原材料的四面内凹金字塔型负泊松比点阵结构模型, 通过MTS万能试验机实施准静态压缩试验和弯曲试验, 研究不同类型点阵结构在有/无Air⁺⁺1671型聚脲涂覆情况下的静态力学性能、破坏模式和能量吸收特性, 得出以下结论.

(1) 压缩试验下, 有无聚脲涂覆对破坏模式的影响较大. 无聚脲涂覆的点阵结构往往会在斜杆两端的交接处首先发生破坏, 压缩变形程度较低. 涂覆聚脲的点阵结构在破坏时压缩变形程度较高, 负泊松比特性更明显. 不同类型点阵结构的压缩应力-应变曲线存在一定差异, 点阵结构涂覆聚脲后的力学性能得到明显提升, 涂覆聚脲的313和333点阵结构的力学曲线出现平台区、密实化区, 平台应力分别为0.89和0.58 MPa左右. 弯曲试验下, 涂覆聚脲对813点阵结构弯曲力学性能的提升主要集中于弹性变形阶段和塑性屈服阶段.

(2) 根据总吸能、单位体积变形能、比吸能、能量吸收效率和压缩利用率等多个指标, 比较了准静态压缩试验下不同点阵结构涂覆聚脲前后的吸能效果.

表 11 (网络版彩图)点阵结构的弯曲破坏图像

Table 11 (Color online) Bending failure image of lattice structure

类型	813-1 (有聚脲 三点弯曲)	813-2 (有聚脲 四点弯曲)
破坏模式
类型	813-3 (无聚脲 三点弯曲)	813-4 (无聚脲 四点弯曲)
破坏模式

结果表明, 点阵结构在涂覆聚脲后的各项吸能指标明显提升. 针对多胞结构, 未涂覆聚脲点阵结构的总吸能在 9 J 以下, 涂覆聚脲点阵结构的总吸能在 290 J 以上. 未涂覆聚脲点阵结构的单位体积变形能在 0.06 J/cm^3 以内、比吸能在 0.43 J/g 以内, 涂覆聚脲点阵结构的单位体积变形能最高可达 1.358 J/cm^3 、比吸能最高可达 4.89 J/g . 由于 313 点阵结构聚脲涂层的厚度大于 333 模型, 因此其单位体积变形能和比吸能大于 333 点阵结构. 未涂覆聚脲点阵结构的能量吸收效率保持在 23% 以内, 涂覆聚脲点阵结构则最大值可达 40.59% 且平台阶段的能量吸收效率变化最大. 未涂覆聚脲点阵结构的压缩利用率保持在 15% 以内, 涂覆聚脲点阵结构则可高达 55.15%. 随着单元数量的增加, 未涂覆聚脲的点阵结构在第一层单元发生脆断时就出现整体失效, 因而内部芯层未得到充分利用, 其单位体积变形能、比吸能、最大能量吸收效率和压缩利用率随单元数量的增加而减小.

(3) 弯曲载荷作用下, 813 点阵夹层结构上、下面板各点的应变状态由拉伸和弯曲的组合变形决定. 上面板靠近压头作用的位置先受压再受拉, 远离压头作

用的位置一直受拉, 下面板一直处于受拉状态. 涂覆聚脲点阵夹层结构的面板应变时程曲线相较于未涂覆聚脲的点阵结构更加平缓. 涂覆聚脲试样的下面板中心位移大于未涂覆聚脲试样, 三点弯曲试样的下面板中心位移大于四点弯曲加载的试样, 位移变形量最大值为 18.18 mm . 聚脲包覆的芯层破坏程度较小, 部分杆件撑破涂覆层. 无聚脲涂覆的芯层在靠近加载的部位几乎完全被压碎, 单元之间发生大范围的错位变形, 上面板的折线型失效模式更明显.

(4) 聚脲弹性体与包括金属材料、非金属材料等在内的基材具有良好的附着力(表 2), 并且聚脲的断裂伸长率较大、拉伸强度较强, 涂覆聚脲模型相比较未涂覆模型在压缩试验的应力-应变曲线中明显多出一段较长的平台区域. 随着涂覆聚脲模型被逐渐压实而进入密实化阶段, 应力和应变的数值迅速增大, 包裹在内的点阵结构被充分压缩使得断裂点远高于未涂覆模型, 所以涂覆聚脲模型表现出良好的压缩力学性能和吸能特性. 涂覆聚脲避免了点阵结构的早期脆断, 多点弯曲试验时上、下面板的应变时程曲线更平滑, 下面板的中心位移大于未涂覆聚脲模型.

参考文献

- 1 Wu L Z, Xiong J, Ma L, et al. Processes in the study on novel composite sandwich panels with lattice truss cores (in Chinese). *Adv Mech*, 2012, 42: 41–67 [吴林志, 熊健, 马力, 等. 新型复合材料点阵结构的研究进展. *力学进展*, 2012, 42: 41–67]
- 2 Yang D Q, Xia L F. Vibration reduction mechanism and design method of floating raft with auxetic components (in Chinese). *Shipbuild China*, 2018, 59: 144–154 [杨德庆, 夏利福. 负泊松比超材料浮筏设计与减振机理研究. *中国造船*, 2018, 59: 144–154]
- 3 Liu K Y. Design and Analysis of Honeycomb Core of Flexible Wing Skin (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Harbin: Harbin Industrial University, 2015 [刘凯宇. 可变形机翼柔性蒙皮蜂窝芯设计与分析. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015]
- 4 Sheng J Y, Guo H Y, Cao Y P, et al. Regional stretch method to measure the elastic and hyperelastic properties of soft materials. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2018, 61: 024611
- 5 Ren X, Zhang X Y, Xie Y M. Research progress in auxetic materials and structures (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2019, 51: 656–687 [任鑫, 张相玉, 谢亿民. 负泊松比材料和结构的研究进展. *力学学报*, 2019, 51: 656–687]
- 6 Su J L, Wu J D, Liu Y L. Progress in elastic property and impact resistance of honeycomb structure mechanical metamaterial (in Chinese). *J Mater Eng*, 2019, 47: 49–58 [苏继龙, 吴金东, 刘远力. 蜂窝结构力学超材料弹性及抗冲击性能的研究进展. *材料工程*, 2019, 47: 49–58]
- 7 Ren X, Das R, Tran P, et al. Auxetic metamaterials and structures: A review. *Smart Mater Struct*, 2018, 27: 023001
- 8 Huang C Y, Tang S, Peng X H. Study of surface instability about hyperelastic films on auxetic substrates under compression (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2017, 49: 758–762 [黄春阳, 唐山, 彭向和. 超弹性薄膜与可压缩基底双层结构表面失稳分析. *力学学报*, 2017, 49: 758–762]
- 9 Gao Y, Liu Z L, Zhuang Z, et al. On the material constants measurement method of a fluid-saturated transversely isotropic poroelastic medium. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 014611
- 10 Mohotti D, Ngo T, Raman S N, et al. Analytical and numerical investigation of polyurea layered aluminium plates subjected to high velocity projectile impact. *Mater Des*, 2015, 82: 1–17

- 11 Chi H, Wang G, Zhao P D, et al. Research and development of explosion resistance of polyurea armored structures (in Chinese). *J Ordnance Equip Eng*, 2020, 41: 100–106 [池海, 王刚, 赵鹏铎, 等. 聚脲装甲结构抗爆性能研究发展. *兵器装备工程学报*, 2020, 41: 100–106]
- 12 Zhang Y F. Numerical Analysis and Experimental Study of Two Kinds of Honeycomb Structures with Negative Poisson's Ratio (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Guangzhou: Jinan University, 2015 [张一帆. 两种负泊松比蜂窝结构的数值分析及试验研究. 硕士学位论文. 广州: 暨南大学, 2015]
- 13 Meza L R, Das S, Greer J R. Strong, lightweight, and recoverable three-dimensional ceramic nanolattices. *Science*, 2014, 345: 1322–1326
- 14 Zhang X, Vyatskikh A, Gao H, et al. Lightweight, flaw-tolerant, and ultrastrong nanoarchitected carbon. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2019, 116: 6665–6672
- 15 Jing L, Wang Z H, Zhao L M. Advances in studies of the mechanical performance of cellular metals and related sandwich structures (in Chinese). *Mech Eng*, 2015, 37: 1–24, 48 [敬霖, 王志华, 赵隆茂. 多孔金属及其夹芯结构力学性能的研究进展. *力学与实践*, 2015, 37: 1–24, 48]
- 16 Ingrole A, Hao A, Liang R. Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement. *Mater Des*, 2017, 117: 72–83
- 17 Zou G P, Wu Y, Xue Q C. Three-point bending performance of SPS composite steel plate (in Chinese). *Ordnance Mater Sci Eng*, 2014, 37: 1–4 [邹广平, 吴晔, 薛启超. SPS复合钢板三点弯曲性能研究. *兵器材料科学与工程*, 2014, 37: 1–4]
- 18 Zhang Q. Experimental Research and Optimization of Flexural Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastic Foam Aluminum Sandwich Structure (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Changsha: Hunan University, 2018 [张谦. 碳纤维复合材料泡沫铝夹芯结构弯曲性能试验研究及优化. 硕士学位论文. 长沙: 湖南大学, 2018]
- 19 Zhang M, Wang X D, Su Y D, et al. Bending behavior of titanium truss core sandwich structure (in Chinese). *Chin J of Nonferrous Metals*, 2018, 28: 457–464 [张弥, 王晓东, 苏亚东, 等. 钛合金点阵夹芯结构弯曲性能. *中国有色金属学报*, 2018, 28: 457–464]
- 20 Gao Q, Wang L M, Zhong H, et al. Research of structure with negative Poisson's ratio under three-point bending (in Chinese). *J Nanjing Univ Sci Technol*, 2019, 43: 141–146 [高强, 王良模, 钟弘, 等. 负泊松比结构的三点弯曲性能研究. *南京理工大学学报*, 2019, 43: 141–146]
- 21 Wang Z, Li Z, Xiong W. Experimental investigation on bending behavior of honeycomb sandwich panel with ceramic tile face-sheet. *Compos Part B-Eng*, 2019, 164: 280–286
- 22 Zhang Q Y, Jin X Q, Zheng Y X, et al. Compressive and energy absorption properties of polyurea-coated concrete under quasistatic or dynamic loadings (in Chinese). *Eng Mech*, 2016, 33: 205–209, 224 [张青艳, 靳晓庆, 郑宇轩, 等. 聚脲包覆混凝土的压缩和吸能特性研究. *工程力学*, 2016, 33: 205–209, 224]
- 23 Xu S. The Impact Resistance Study of Polyurea Composite Structures (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015 [许帅. 聚脲弹性体复合结构抗冲击防护性能研究. 硕士学位论文. 北京: 北京理工大学, 2015]
- 24 Liu Q Q, Wang S P, Lin X, et al. Numerical simulation on the anti-penetration performance of polyurea-core Weldox 460 E steel sandwich plates. *Composite Struct*, 2020, 236: 111852
- 25 Zhang Z H, Huang X F, Liu B Y, et al. Structure of octagonal cubic lattice sandwich panel with inner concavity (in Chinese). *China Patent*, CN108953443-B, 2019-12-17 [张振华, 黄秀峰, 刘伯檐, 等. 内凹八边形方点阵夹层板结构. 中国专利, CN108953443-B, 2019-12-17]
- 26 Zhang M Y, Zhang Z H. Effect of printing parameters of fused deposition molding on mechanical properties of samples (in Chinese). *Plastics Sci Technol*, 2019, 47: 44–49 [张明悦, 张振华. 熔融沉积成型打印参数对试样力学性能的影响. *塑料科技*, 2019, 47: 44–49]
- 27 Zhang W. The Study on Axial Compression Properties of Three-dimensional Negative Poisson's Ratio Cellular Structure (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2015 [张伟. 三维负泊松比多胞结构的轴向压缩性能研究. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2015]
- 28 Yu J J, Xie Y, Pei X. State-of-art of metamaterials with negative Poisson's ratio (in Chinese). *J Mech Eng*, 2018, 54: 1–14 [于靖军, 谢岩, 裴旭. 负泊松比超材料研究进展. *机械工程学报*, 2018, 54: 1–14]
- 29 Cui S T, Wang B, Zhang K. Mechanical behavior and energy absorption of honeycomb with negative Poisson's ratio under in-plane dynamic compression (in Chinese). *Chin J Appl Mech*, 2017, 34: 919–924, 1015 [崔世堂, 王波, 张科. 负泊松比蜂窝面内动态压缩行为与吸能特性研究. *应用力学学报*, 2017, 34: 919–924, 1015]
- 30 Ivañez I, Fernandez-Cañadas L M, Sanchez-Saez S. Compressive deformation and energy-absorption capability of aluminium honeycomb core. *Comp Struct*, 2017, 174: 123–133
- 31 Pan D, Guo Y F, Fu Y G, et al. Static cushioning and energy absorption of composite layered structures with paper sandwich core and plastic foam (in Chinese). *Eng Mech*, 2019, 36: 249–256 [潘丹, 郭彦峰, 付云岗, 等. 纸夹芯和泡沫复合层状结构的静态缓冲吸能特性研究. *工程力*

学, 2019, 36: 249–256]

- 32 Lu J. Investigation on Fatigue Behavior of Metallic Honeycomb Sandwich Structures (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Harbin: Harbin Engineering University, 2011 [芦颢. 金属蜂窝夹芯结构的疲劳行为研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011]
- 33 Wu L Z, Xiong J, Ma L. Mechanical Properties Characterization of Composite Lattice Structures (in Chinese). Beijing: Science Press, 2015. 48–58 [吴林志, 熊健, 马力. 复合材料点阵结构力学性能表征. 北京: 科学出版社, 2015. 48–58]

Static mechanical properties of three-dimensional polyurea-coated lattice structures with negative Poisson's ratio

HUANG XiuFeng[†] & ZHANG ZhenHua^{†*}

College of Naval Architecture & Ocean, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

This paper studies the static mechanical properties of four-sided concave pyramid-type lattice structures with a polyurea coating and a negative Poisson's ratio. Experimental models of different types were made by the additive manufacturing method. Quasi-static compression experiments of lattice structures, and three-point and four-point bending experiments of lattice sandwich structures, were implemented. The lattice structure exhibited a significantly negative Poisson's ratio effect under compressive load. Under platform stresses of 0.6–1.0 MPa, the polyurea coating obviously improved the mechanical properties of the lattice structures. The total energy absorption, deformation energy per unit volume, and specific energy absorption were significantly higher (by 1–2 orders of magnitude) in the multicellular polyurea-coated models than in the uncoated models. The maximum energy-absorption efficiency and compression utilization in the polyurea-coated models reached 40.59% and 55.15%, respectively. In the lattice structures without polyurea, the deformation energy per unit volume, specific energy absorption, maximum energy-absorption efficiency, and compression utilization decreased with increasing number of units. These trends are attributable to early brittle fracture. Meanwhile, the energy-absorption characteristics of the polyurea-coated lattice structures largely depended on the polyurea thickness. Under a bending load, the polyurea-uncoated lattice sandwich structures were prone to partial core collapse, especially around the indenter. The destruction degree reduced layer by layer outward to the core. The upper and lower panels showed fold-line deformation and a curved deformation mode, respectively. The upper panel developed a “U-shaped” deformation mode at an early stage, and its core failure range was widely reduced. The lower panel was 19.61%–42.03% more deformed in the polyurea-coated than in the uncoated lattice sandwich structures. The results provide a reference for the design of lightweight and efficient energy-absorptive structures for ship protection.

negative Poisson's ratio, lattice structure, polyurea, compression experiment, multi-point bending experiment, additive manufacturing

PACS: 81.05.LG, 07.10.Pz, 67.80.Cx, 81.05.Qk

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0180](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0180)