

泡沫铝填充双层金属点阵结构增强效应及吸能特性

张万波¹, 闫雷雷², 赵 雪¹, 苏鹏博³, 卢天健^{3,4}

(1. 空军工程大学, 陕西 西安 710051)

(2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

(3. 西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

(4. 南京航空航天大学 机械结构力学与控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘 要: 通过激光焊接获得 3 种不同几何构型的双层金属点阵结构, 再将闭孔泡沫铝切割后填充到其孔隙当中获得一种新型泡沫铝填充双层金属点阵结构。采用实验和有限元模拟的方法研究其准静态面外压缩载荷作用下的承载能力、吸能特性及机理、变形破坏模式等。结果表明, 泡沫铝的填充能够有效改变空心点阵结构的后屈曲行为, 提高点阵芯体单元的屈曲稳定性, 具有明显的耦合增强效应, 表现在承载及能量吸收效率的大幅提升, 可达到对应空心结构的 10 倍以上。

关键词: 泡沫铝; 波纹结构; 有限元模拟; 增强效应; 能量吸收

中图分类号: TG115.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)12-3911-06

金属点阵结构及金属泡沫结构均为轻质高强及高能量吸收材料的杰出代表, 多年来得到国内外众多研究者的广泛关注, 并在工程实际中得到了大量应用^[1-4]。金属点阵结构具有轻质 (孔隙率可高达 99%)、高强 (高比强度、高比刚度、高韧性)、多功能可设计性^[5]等优良特性, 在结构材料方面具有得天独厚的优势^[2,6], 而金属泡沫具有轻质 (孔隙率可高达 90%)、缓冲吸能、阻尼减振、隔声吸声、隔热耐火、电磁屏蔽等特性, 多功能特性使其更多作为功能材料使用^[3,7]。

金属点阵结构在静态及动态压缩、剪切、弯曲等载荷作用下和传统材料相比具有明显的强度、刚度及能量吸收方面的性能优势^[8-10], 金属点阵三明治夹芯结构在爆炸及侵彻等极端冲击载荷作用下仍具有非常优异的抗冲击性能^[11,12]。但与此同时无论是静态还是动态冲击载荷作用下, 金属点阵芯体其芯体单元 (如板或者杆件结构) 都会在达到峰值载荷后发生屈曲破坏, 从而使得结构的承载及能量吸收效率大大降低, 这使得其工程应用范围受到极大的限制^[13,14]。与此同时, 以闭孔泡沫铝为代表的泡沫金属由于其具有非常长的应力平台区域, 这使得其具有非常高的能量吸收效率, 在冲击能量吸收方面具有非常广阔的应用前景^[15,16]。但泡沫铝在制备过程中不可避免地会形成大量的制备缺陷, 如孔隙不均匀、胞壁缺失、超大及

不规则孔隙等, 这对其力学性能会产生非常大的影响^[17,18], 同时由于基体材料铝及其合金与不锈钢等其它金属相比具有相对比较低的强度, 因此其应力仍维持在一个较低的水平, 这大大限制了其作为工程结构件的应用。

综上所述, 提高金属点阵芯体单元的屈曲稳定性和提高泡沫金属的平台应力使得其具有更高的强度及能量吸收效率, 是金属多孔材料研究的首要任务。Yan 等^[14,19]的研究表明通过将泡沫铝与金属点阵结构复合获得的点阵泡沫复合结构可以实现 1+1>2 的耦合增强效应, 并对其增强机理进行了研究^[20]。Yu 等^[21]对其冲击载荷作用下的力学性能研究表明强化效应和惯性效应共同主导着点阵泡沫复合结构的动态冲击行为。Zhang 等^[22]对其爆炸载荷作用下的力学性能研究表明点阵泡沫复合结构可以有效地抵抗爆炸冲击。Yang 等^[23]利用金属桁架与泡沫铝进行复合, 使得金属桁架由单一的拉伸断裂破坏改变为拉伸断裂和压缩破坏同时进行, 提升了结构的压缩应力。上述研究结果表明泡沫铝和金属点阵结构的复合设计是提高金属点阵和金属泡沫结构力学性能的一种简单而有效的方法。

本研究制备获得了 3 种不同几何构型的泡沫铝填充双层金属点阵结构, 并对其压缩力学性能进行了实验表征, 同时基于 ABAQUS/Explicit 软件对其准静态

收稿日期: 2019-03-09

基金项目: 国家自然科学基金 (11702326); 国家博士后基金 (2018M633493); 陕西省博士后基金 (2017BSHYDZZ74)

作者简介: 张万波, 男, 1994 年生, 硕士, 空军工程大学基础部, 陕西 西安 710051, E-mail: 13201689787@163.com

压缩行为进行数值模拟, 对其应力应变曲线、峰值应力、吸能特性及耦合增强效应等进行分析。

1 实 验

本实验泡沫铝材料采用熔体发泡法制备的闭孔泡沫, 基体材料为 Al-7Si 铝硅合金, 相对密度为 $\rho_f = 0.24$, 孔径为 1~3 mm。为了避免试样尺寸带来的影响, 试样的最小尺寸方向至少包含 7 个以上孔径。金属点阵结构芯体和面板材料均为厚度为 0.41 mm 的 AISI 304 不锈钢板材, 密度为 $\rho_s = 7900 \text{ kg/m}^3$ 。考虑加工制备简单, 制造成本低, 本实验金属点阵结构选取波纹结构, 采用激光逐层焊接的方式获得。再将闭孔泡沫铝切割为和波纹芯体孔隙尺寸一致的三棱柱, 然后填充到其孔隙当中并用环氧树脂粘接固化即可获得泡沫铝填充波纹板。具体制备过程详见参考文献[14,20,24]。

图 1 所示为制备获得的 3 种不同几何构型的空心及泡沫铝填充双层金属波纹板结构准静态压缩试样^[24]。所有测试试样均选取 2 个基本胞元, 波纹芯体与面板倾角 $\alpha=45^\circ$, 单层芯体高度 $H=17 \text{ mm}$, 试样宽度 $B=20 \text{ mm}$ 。其中芯体的相对密度 ρ_c 定义为芯体密度 ρ 与不锈钢密度 ρ_s 之比。

针对图 1 所示 3 种 (type A, type B, type C) 不同几何构型空心及泡沫铝填充双层金属波纹板结构试样, 采用西安交通大学强度与振动国家重点实验室的 MTS 实验加载系统进行准静态面外压缩实验。为了实现试样的面外压缩加载, 设计了一对平压头以实现对整个加载面的均匀加载。为了确保准静态加载, 采取位移控制方式, 加载速率为 1 mm/min ($<10^{-3} \text{ s}^{-1}$)。每个试样的压缩应变都达到 60% 以上以获得试样完整的面外压缩力学行为。所有试样在实验过程中均没有出现焊点脱开现象, 显示了良好的激光焊接效果。为了获得实验压缩过程中试样完整的变形演化过程, 对实验过程采用高分辨率摄像机进行全程录像。

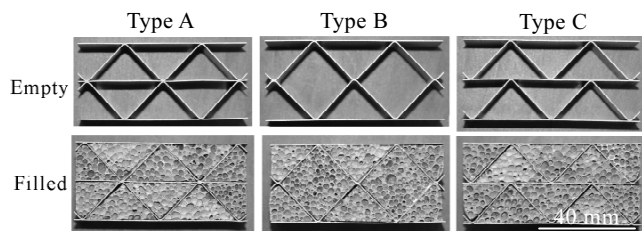


图 1 3 种几何构型空心及泡沫铝填充双层金属波纹板结构

Fig.1 Three type configurations of empty and aluminum foam-filled double sandwich structures

2 数值模拟

为了进一步研究试样的耦合增强效应和吸能机理, 采用 ABAQUS/Explicit 有限元软件对结构的准静态面外压缩行为进行了数值模拟。

2.1 材料参数

AISI 304 不锈钢面板和波纹芯体均采用各向同性弹塑性固体本构模型, 密度 $\rho_s = 7900 \text{ kg/m}^3$, 杨氏模量 $E_s=210 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu=0.3$, 屈服强度 $\sigma_y=210 \text{ MPa}$ 。泡沫铝采用 Deshpande 与 Fleck 的可压缩泡沫本构模型, 该模型将泡沫铝进行了均匀化等效^[25], 其中杨氏模量 $E_f = 2.61 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu_f = 0.3$, 塑性泊松比 $\nu_p = 0$ 。

2.2 有限元模型

图 2 所示为空心及泡沫铝填充双层金属波纹板的有限元模型。模型分为两部分, 中间部分为三维实体单元, 模拟金属面板、波纹芯体和泡沫铝, 上下部分为 2 个刚性平板 (rigid plate) 来模拟实验过程上下加载压头。

在数值计算的过程中, 对每一个模型都进行了网格收敛分析和时间收敛分析, 通过计算虚应变能、动能占总应变能的比例, 使得虚应变能和动能的大小可忽略不计 ($<5\%$), 减少由于网格划分引起的沙漏现象和加载速度过快无法满足准静态压缩等带来的计算误差, 从而提高模型的计算精度。

3 结果与讨论

3.1 模型验证

图 3 所示为 3 种不同几何构型的空心及泡沫铝填充双层金属波纹结构准静态面外压缩实验和数值仿真应力应变曲线对比, 数值计算结果和实验结果吻合较好。图 3a, 3c 对应的空心波纹板峰值强度实验结果低于仿真结果, 由于波纹芯体单元厚度仅为 0.41 mm 厚的不锈钢板, 材料本身在加工过程中不能保证为完全平面, 加上焊接过程中要求面板与芯体进行接触, 施加的初始载荷即可导致其发生屈曲, 而数值模型则将

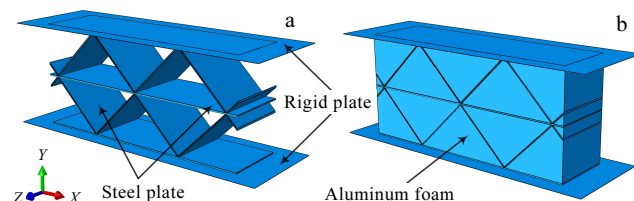


图 2 A 型空心及泡沫铝填充双层金属波纹板的有限元模型

Fig.2 Finite element model of type A empty (a) and aluminum foam-filled double sandwich (b) structure

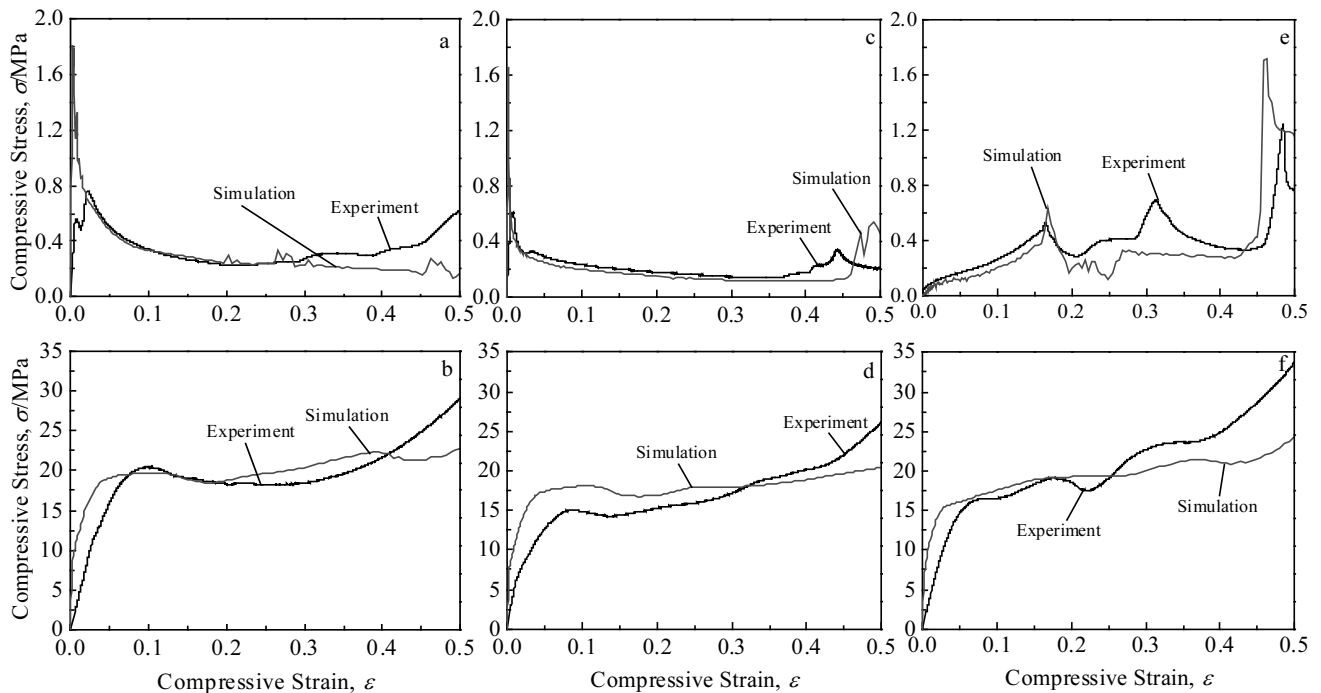


图 3 3 种类型空心及泡沫铝填充双层点阵结构准静态压缩应力应变曲线实验和仿真结果对比

Fig.3 Experimental and simulated nominal compressive stress-strain curves of empty (a, c, e) and foam-filled double-layer lattice structures: (a, b) type A, (c, d) type B, and (e, f) type C

其视为理想平面, 因此产生较大误差, 但后屈曲阶段二者能够很好地吻合。另外, 数值模拟的刚度(弹性段斜率)大于实验测试结果, 一方面是因为前面分析的试样初始缺陷的影响, 另一方面是实验机本身的刚度的影响, 在计算过程中并未考虑导致位移测试存在较大误差, 后期如果采用非接触光学应变测量等先进技术可减小这一误差。图 4 所示为 3 种不同几何构型的空心及泡沫铝填充双层金属波纹结构在不同应变下(0、0.05、0.1、0.3 和 0.5)的实验和数值模拟得到变形形貌对比。由图可以看出数值模拟得到的波纹芯体单元变形形貌与实验结果均能够很好地吻合, 进一步验证了本研究数值结果的准确性。

3.2 应力应变分析

为了对比分析, 对泡沫铝进行了准静态压缩性能测试, 试样尺寸为 $\Phi 35 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 。图 5 所示为泡沫铝准静态压缩应力应变曲线, 为典型的泡沫金属应力应变曲线, 其很长的应力平台区显示出泡沫铝具有优异的能量吸收效果^[3]。图 6 所示为其在不同应变下的变形形貌。由图可以看出泡沫铝在准静态压缩过程中是逐层破坏的, 压缩应变达到 0.3 时, 最底端泡沫依旧没有破坏。

由图 3 可以看出, 对于空心波纹结构, Type A 和

Type B 结构试样的应力应变曲线达到初始峰值后会显著下降, 之后维持在一个较低水平, 由图 4 对应的变形模式演化可以看出这是由于此时波纹芯体单元发生了明显的屈曲变形, 从而导致应力的显著下降。对于 Type C 结构试样在线性段斜率明显要低于其它 2 种结构, 这是由于几何构型上 Type C 结构中间面板芯体单元在加载过程中相当于承受一个三点弯曲载荷(焊接点相当于加载点), 因此其刚度会明显低于轴向加载情况。应力在达到峰值时候也会发生明显下降, 这是由于此时波纹芯体单元发生了屈曲。

对于泡沫铝填充波纹结构, 3 种不同几何构型的试样则没有表现出明显的区别。应力应变曲线均在经历过线性和非线性上升后呈现出很长的平台区, 类似泡沫结构, 表现出优异的能量吸收特性。由图 3 的应力应变曲线和图 4 的变形模式演化过程也可说明泡沫铝的填充很大程度上提高了金属波纹结构芯体单元的屈曲稳定性, 使得其承载能力及能量吸收效率得到大幅提升。

3.3 峰值应力

实验(Exp.)和数值(Sim.)计算得到的空心及泡沫铝填充双层波纹板峰值应力 σ^{Peak} 如表 1 所示。与此同时, 考虑到二者密度的区别, 将其进行了无量纲化处

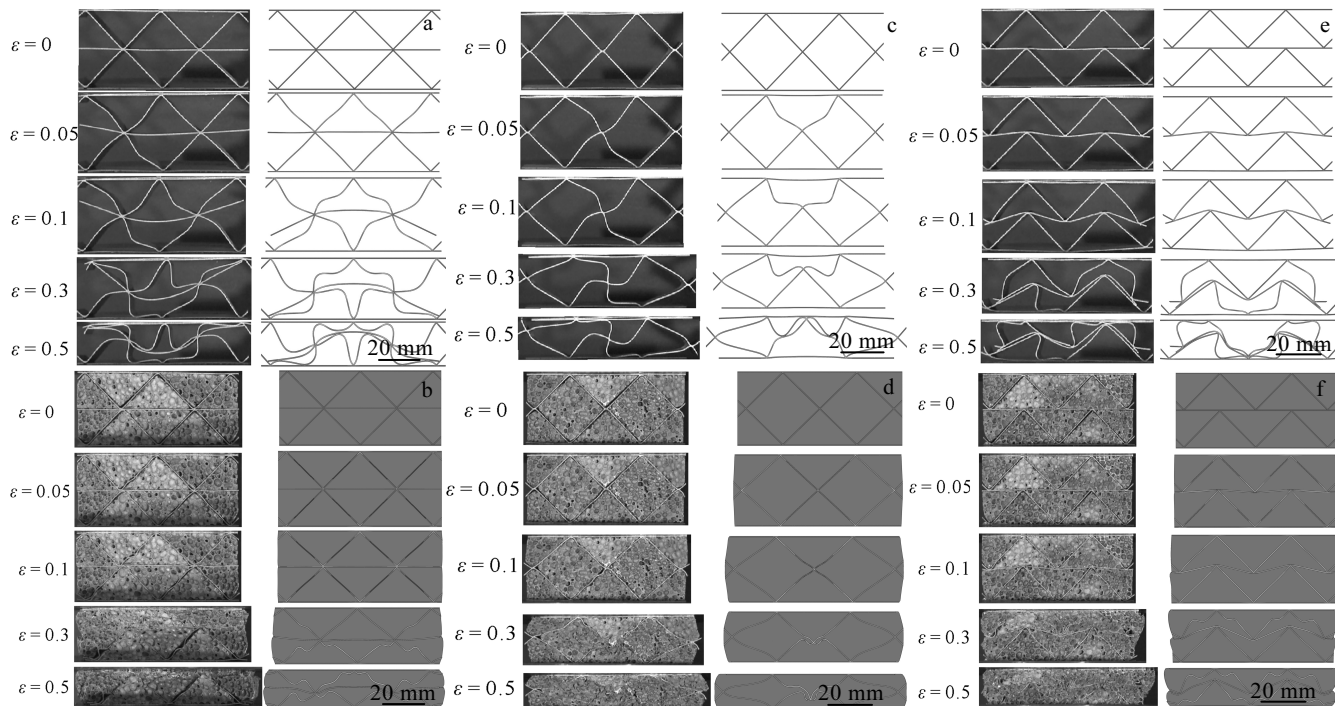


图 4 空心及泡沫铝填充双层波纹板在不同应变下的实验和仿真变形形貌

Fig.4 Experiment and simulation deformation histories of empty (a, c, e) and aluminum foam-filled double sandwich (b, d, f) structures: (a, b) type A, (c, d) type B, and (e, f) type C

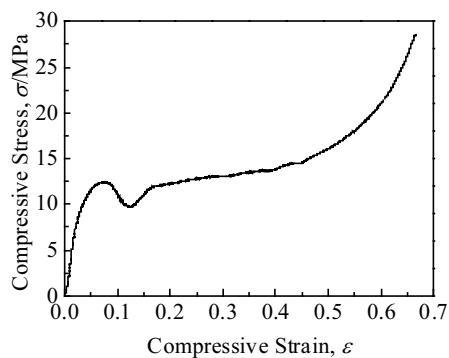


图 5 泡沫铝应力应变曲线

Fig.5 Nominal compressive stress-strain curve of aluminum foam

理, 得到单位质量峰值压缩应力, 即比强度, 定义为 $\sigma^{\text{Peak}}/(\sigma_y \rho_c)$, 其中 ρ_c 为芯体平均相对密度, σ_y 为 AISI 304 不锈钢的屈服应力, 在此处取为 210 MPa^[14,20]。

由表 1 可以看出泡沫铝的填充使得 3 种不同构型双层波纹结构的 σ^{Peak} 和 $\sigma^{\text{Peak}}/(\sigma_y \rho_c)$ 均有大幅度的提升。Type A、Type B 和 Type C 3 种结构的单位质量峰值压缩强度 $\sigma^{\text{Peak}}/(\sigma_y \rho_c)$ 实验结果分别为对应空心结构的 8, 7.1, 9.3 倍, 而计算结果提升了 3.6, 3.1, 9.8 倍, 泡

沫铝填充结构的比强度要远高于对应的空心结构。和具有高比强度的泡沫铝相比, 泡沫铝填充结构也具有明显的性能优势。

3.4 吸能特性

单位体积吸收的能量 W_v , 定义为:

$$W_v = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

其中, σ 为结构芯体的压缩应力, ε 为结构芯体的压缩应变, 应变的积分上限 $\bar{\varepsilon} = 0.5$ ^[20]。考虑到泡沫铝的填充引起了密度的提高, 引入单位质量能量吸收, 即比能量吸收 SEA (specific energy absorption) W_m , 定义为^[20]:

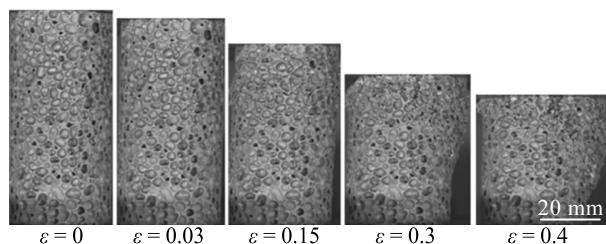


图 6 泡沫铝在不同应变下的变形形貌

Fig.6 Photographs of the deformation history under different compressive strains

表 1 空心及泡沫铝填充双层波纹板准静态压缩实验和仿真结果对比

Table 1 Comparison between quasi-static compression experiment and simulation results of empty and aluminum foam-filled double sandwich structures

Specimen	ρ_c	$\sigma^{\text{Peak}}/\text{MPa}$		$\sigma^{\text{Peak}}/(\sigma_y \rho_c)$		$W_v/\times 10^3 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$		$W_m/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	
		Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
Type A	Empty	0.032	0.76	1.80	0.11	0.27	0.17	0.15	0.67
	Filled	0.11	20.41	22.31	0.88	0.97	9.60	9.80	11.05
Type B	Empty	0.032	0.61	1.66	0.091	0.25	0.11	0.10	0.44
	Filled	0.11	15.03	18.08	0.65	0.78	8.33	9.08	9.59
Type C	Empty	0.032	0.60	0.64	0.089	0.095	0.20	0.17	0.79
	Filled	0.11	19.12	21.43	0.83	0.93	10.29	9.48	11.84
Aluminum foam		0.082	9.5 (Exp.)		4.66 (Exp.)		4.59 (Exp.)		8.5 (Exp.)

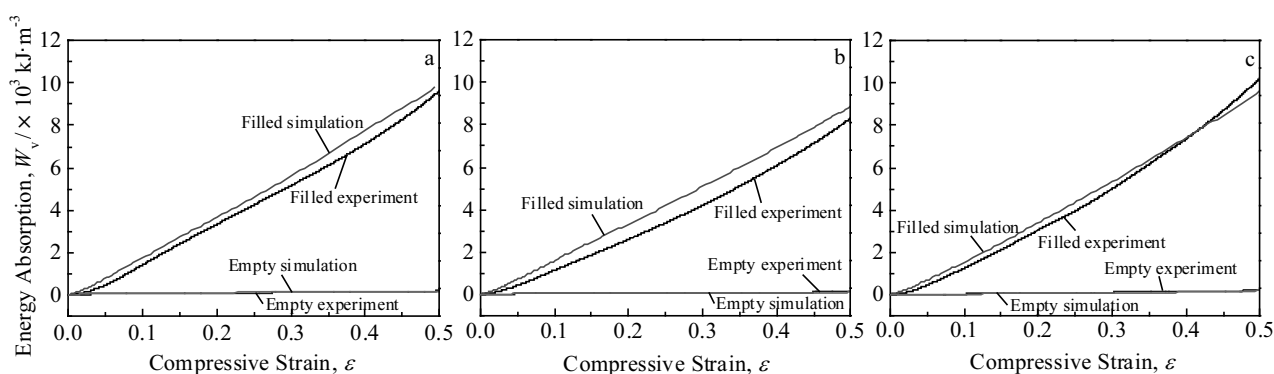


图 7 空心及泡沫铝填充双层波纹板单位体积能量吸收随应变的变化曲线

Fig.7 Energy absorption per volume versus compressive stain of empty and aluminum foam-filled double sandwich structures:

(a) type A, (b) type B, and (c) type C

$$W_m = W_v / (\rho_c \rho_s) \quad (2)$$

式中: ρ_c 为芯体的平均相对密度, ρ_s 为 AISI 304 不锈钢的密度, $\rho_s = 7900 \text{ kg/m}^3$ 。

图 7 所示为 3 种不同构型的空心及泡沫铝填充双层金属波纹板单位体积能量吸收随应变的变化曲线。由图可以看出空心双层波纹结构和对应的泡沫铝填充结构相比, 其能量吸收效率几乎可以忽略, 表明泡沫铝的填充可以将金属点阵结构转换为一种更加高效的能量吸收结构。同时可以看出, 泡沫铝填充结构的数值计算结果高于对应的实验结果, 原因在于本研究涉及的波纹芯体单元壁厚较薄, 只有 0.41 mm, 因此初始缺陷及焊接和复合过程中产生的缺陷较多。

实验(Exp.)和数值(Sim.)计算得到的空心及泡沫铝填充双层波纹的单位体积能量吸收 W_v 和单位质量能量吸收 W_m 如表 1 所示。Type A、Type B 和 Type C 3 种结构的比能量吸收 SEA 实验结果分别为对应空心结构的 16.5, 21.8, 15.0 倍, 而计算结果提升了 19.0, 25.8, 16.3 倍, 泡沫铝填充结构的比能量吸收 W_m 要远高于对应的空心结构。和优异吸能结构泡沫铝相比, 泡沫铝填充结构仍具有显著优势。

4 结 论

1) 应力应变曲线和变形模式的实验和有限元结果对比表明本研究数值模型能够较好地模拟这种新型复合结构。

2) 实验和数值模拟结果表明本研究泡沫铝填充双层金属点阵结构的比强度和比能量吸收和对应的空心波纹结构相比十分具有优势。

参考文献 References

- [1] Jing Lin(敬霖), Wang Zhihua(王志华), Zhao Longmao(赵隆茂). *Mechanics in Engineering(力学与实践)*[J], 2015, 37(1): 1
- [2] Evans A G, Hutchinson J W, Fleck N A et al. *Progress in Materials Science*[J], 2001, 46(3-4): 309
- [3] Banhart J. *Progress in Materials Science*[J], 2001, 46(6): 559
- [4] Qiao Jichao(乔吉超), Xi Zhengping(奚正平), Tang Huiping(汤慧萍) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2010, 39(3): 561
- [5] Jiang W, Yan L L, Ma H et al. *Scientific Reports*[J], 2018, 8(1): 4817

- [6] Zhao Bing(赵冰), Li Zhiqiang(李志强), Hou Hongliang(侯红亮) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(8): 2189
- [7] Hao Q X, Qiu S W, Hu Y B. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2015, 44(3): 548
- [8] Pingle S M, Fleck N A, Deshpande V S *et al. International Journal of Solids and Structures*[J], 2011, 48(25-26): 3417
- [9] Chen D H. *Thin-Walled Structures*[J], 2012, 51: 82
- [10] Xiong J, Vaziri A, Ma L *et al. Composite Structures*[J], 2012, 94(2): 793
- [11] Vaziri A, Xue Z Y, Hutchinson J W. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*[J], 2006, 1(1): 97
- [12] Tagarielli V L, Deshpande V S, Fleck N A. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2010, 37(7): 854
- [13] Wadley H N G, Fleck N A, Evans A G. *Composites Science and Technology*[J], 2003, 63(16): 2331
- [14] Yan L L, Yu B, Han B *et al. Composites Science and Technology* [J], 2013, 86: 142
- [15] Shi Shaoqing(石少卿), Kang Jiangong(康建功), Sui Shunbin(隋顺彬). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(S2): 150
- [16] Peroni L, Avalor M, Peroni M. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2008, 35(7): 644
- [17] Guo Ruiping(郭瑞平), Liu Guanting(刘官厅), Fan Tianyou(范天佑). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(S3): 293
- [18] Jeon I, Asahina T. *Acta Materialia*[J], 2005, 53(12): 3415
- [19] Yan L L, Han B, Yu B *et al. Materials & Design*[J], 2014, 60: 510
- [20] Yan Leilei(闫雷雷), Zhao Xue(赵雪), Zhao Jingbo(赵静波) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(2): 503
- [21] Yu B, Han B, Ni C Y *et al. Journal of Applied Mechanics*[J], 2015, 82(1): 011 006
- [22] Zhang P, Cheng Y S, Liu J *et al. Composites Part B: Engineering*[J], 2016, 105: 67
- [23] An Y K, Yang S Y, Zhao E T *et al. Composite Structures*[J], 2017, 178: 288
- [24] Zhao Xue(赵雪), Yan Leilei(闫雷雷), Lu Tianjian(卢天健) *et al. Journal of Air Force Engineering University*(空军工程大学学报)[J], 2017, 18(4): 28
- [25] Deshpande V S, Fleck N A. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*[J], 2000, 48(6-7): 1253

Enhancement Effect and Energy Absorption of Double-Layer Metallic Lattice Structure Filled with Aluminum Foam

Zhang Wanbo¹, Yan Leilei², Zhao Xue¹, Su Pengbo³, Lu Tianjian^{3,4}

(1. Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(4. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Three kinds of double-layer metal lattice structures with different geometries were obtained by laser welding, and then a closed-cell aluminum foam was filled into the pores to obtain a new foam aluminum-filled double-layer lattice structure. The experimental and finite element simulation methods were used to study the bearing capacity, energy absorption characteristics and mechanism, and deformation failure mode under quasi-static surface compression load. The results show that the filling of aluminum foam can effectively change the post-buckling behavior of the hollow lattice structure, improve the buckling stability of the lattice core unit, and have obvious coupling enhancement effect, which is manifested in the significant increase of bearing capacity and energy absorption efficiency.

Key words: aluminum foam; corrugated panel; finite element method; enhancement; energy absorption

Corresponding author: Yan Leilei, Ph. D., Associate Professor, School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, E-mail: yanleilei@nwpu.edu.cn