

泡沫铝填充金属波纹板耦合增强机理研究

闫雷雷^{1,3}, 赵雪¹, 赵静波¹, 李斌潮², 张钱城³, 卢天健³

(1. 空军工程大学, 陕西 西安 710051)

(2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

(3. 西安交通大学 多功能材料和结构教育部重点实验室 陕西 西安 710049)

摘要: 将闭孔泡沫铝填充到空心金属波纹板孔隙当中即可获得泡沫铝填充波纹板结构, 对其准静态压缩吸能特性进行实验表征。研究表明, 泡沫铝填充波纹板其压缩应力远高于泡沫铝与空心波纹板二者单独压缩应力之和, 表现出明显的耦合增强效应, 其单位质量峰值抗压缩强度及单位质量能量吸收率(SEA)可分别高达对应空心结构的 6.3 及 14.8 倍, 即使和泡沫铝相比, 其 SEA 仍可提高 50%以上。进一步通过对空心波纹芯体结构的屈曲变形模式研究表明, 泡沫铝的填充给予了波纹芯体单元足够强的横向支撑, 使其变形模式转变为空心结构难以产生的更加高阶的屈曲变形模式, 屈曲波长变短, 产生耦合增强效应。

关键词: 泡沫金属; 波纹板; 应力-应变; 耦合增强; 屈曲

中图分类号: TF125.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)02-0503-06

周期性金属点阵^[1]及随机金属泡沫结构^[2-4]为轻质金属多孔材料的杰出代表, 由于具有高的孔隙率, 高比强度、比刚度及能量吸收率等力学特性, 在轻质材料与结构冲击能量吸收领域极具应用潜力^[5]。金属点阵结构在应力达到峰值时由于芯体单元的屈曲通常会发生载荷迅速下降, 从而丧失承载能力, 也影响结构的安全使用^[6]; 而金属泡沫材料虽然其长的应力平台区赋予其优异的能量吸收特性, 但由于制备缺陷等因素的存在往往具有较低的强度, 从而极大地限制了其作为主承载结构的使用^[7,8]。多孔金属作为承载结构使用要求其具有高的强度及能量吸收效率, 因此抑制或推迟金属点阵的屈曲及提高金属泡沫的强度成为材料工作者亟待解决的难题。

为了抑制金属点阵材料芯体单元屈曲行为的发生, A. Vaziri 等人通过将聚合物泡沫填充到金属波纹及蜂窝夹芯三明治结构中^[9], 也有学者将聚合物泡沫与铝蜂窝进行复合^[10,11], 试图通过泡沫的约束作用来提高其抗屈曲能力, 从而提高其强度及能量吸收效率。但由于聚合物泡沫和金属点阵芯体相比强度较低, 对芯体单元的支撑能力有限, 效果并不显著。而对聚合物泡沫填充复合材料波纹板^[12]及聚合物金字^[13]三明治结构的研究则表明, 填充物可以明显提高其芯体单元的屈曲稳定性。

金属泡沫作为填充结构被广泛用来与金属管件结构进行复合^[14,15]。研究表明, 泡沫铝填充金属圆管和泡沫铝及空心金属圆管相比, 其轴向压缩性能得到了显著提升, 其峰值载荷及平台区载荷均高于二者单独压缩之和, 表现出耦合增强效应, 原因在于泡沫铝的填充使得金属管件屈曲波长变短^[1]。Yan 等人^[16,17]对泡沫铝填充金属波纹板的压缩及弯曲性能进行了初步研究, 发现泡沫铝的填充使得金属波纹板抵抗压缩及弯曲变形的能力以及能量吸收效率得到了显著提升, 具有明显的耦合增强效应, 但对其耦合增强机理缺乏进一步的理论分析。

本实验通过改变波纹芯体板材的厚度获得不同相对密度的空心及泡沫铝填充波纹板, 并对其压缩吸能特性进行研究, 对其强度及能量吸收特性进行了定量分析。在此基础上, 重点对空心波纹板芯体单元峰值压缩强度进行了理论预测, 并对其屈曲变形模式进行了分析, 进而揭示泡沫铝填充波纹板的耦合增强机理。

1 实验

金属点阵结构采用金属波纹板作为芯体结构, 其中面板和芯体材料均采用普通商用 304#不锈钢板材, 面板与芯体通过激光焊接进行连接。泡沫金属选用通过熔体发泡法制得的球形孔闭孔泡沫铝, 基体材料为

收稿日期: 2017-02-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973”计划)(2011CB610305); 高等学校学科创新引智计划 (“111”计划)(B06024); 国家自然科学基金 (11472209, 11472208, 11447147, 11504429); 陕西省自然科学基金 (2015JQ5155)

作者简介: 闫雷雷, 男, 1985 年生, 博士, 讲师, 空军工程大学理学院, 陕西 西安 710051, 电话: 029-84786557, E-mail: rayll@stu.xjtu.edu.cn

AlSi₇ 铝硅合金, 相对密度为 $\rho_f=0.24$, 孔径为 1~3 mm。

泡沫铝填充波纹夹芯三明治板的制备通过切割、填充、粘接等步骤完成。泡沫铝与金属面板的连接最常用的方式是胶结^[18], 虽然相比冶金结合^[19]具有相对较弱的粘接界面, 但由于制备工艺简单及制备成本较低, 本研究仍选取环氧树脂作为粘接剂来粘接。考虑到泡沫铝与波纹芯体粘接界面可能对实验结果产生影响, 实验过程中对界面做了细致处理, 以期达到较好的界面结合强度。图 1b 所示为泡沫铝与波纹芯体的局部粘接效果图。可以看出, 泡沫铝与波纹芯体之间几乎没有间隙的存在, 显示出良好的粘接界面。空心及泡沫铝填充波纹板具体制备过程可参考文献^[16]。

图 1a 所示为波纹芯体单元尺寸示意图。其中芯体高度 H 和试样宽度 B 均为 20 mm, 倾角 α 为 45°, 通过改变芯体板材厚度 t 来改变空心及泡沫铝填充波纹板的相对密度, 其中面板和芯体板材厚度 h 和 t 相同, 分别为 0.30, 0.41, 0.82, 及 1.42 mm, 图 1c 和 1d 所示分别为制备好的不同相对密度的空心及泡沫铝填充波纹板准静态压缩试样。夹芯板芯体的密度与不锈钢的密度 ρ_s 之比定义为平均相对密度 ρ_c ^[16]:

$$\rho_c = v_s \rho_s + \rho_f (1 - v_s) \tag{1}$$

其中 v_s 为波纹芯体单元所占体积分数^[9]:

$$v_s = \frac{t/H}{t/H + \cos \alpha} \tag{2}$$

空心波纹板及泡沫铝填充波纹板的准静态面外压缩性能测试通过西安交通大学强度与振动国家重点实验室的 MTS 实验加载系统完成。为了对比, 对泡沫铝的准静态压缩性能也进行了测试。为了实现试样的面外压缩测试, 设计了一对平压头以实现对整个加载面的均匀加载。实验过程中加载速率控制为 0.5 mm/min ($<10^{-3} \text{ s}^{-1}$), 可以保证试样的加载为准静态加载。为了研究试样在加载过程的变形破坏机理, 采用高分辨率摄像机对试样的整个实验过程进行了录像, 以便对其

破坏模式进行分析。为了获得试样完整的面外压缩力学行为, 每个试样的压缩应变都达到 60% 以上。所有试样在实验过程中均没有出现焊点脱开现象, 显示了试样的良好焊接效果。

2 结果与分析

2.1 应力-应变曲线分析

图 2 所示为空心波纹板及泡沫铝填充波纹板的典型应力-应变曲线。由图可以看出, 和空心波纹板及泡沫铝不同, 泡沫铝填充波纹板其准静态压缩呈现如下显著特征:

(1) 泡沫铝填充波纹板与空心波纹板不同的是其线弹性阶段结束后并没有马上达到应力峰值, 而是经历一个缓慢的非线性上升后才达到应力峰值, 峰值应力对应的应变为 10%~15%, 远大于空心波纹板的峰值应变(不超过 3%)。由于波纹板芯体单元的屈曲变形会导致应力的迅速下降, 其峰值应力即对应波纹芯体单元屈曲变形的发生。因此泡沫铝的填充大大延迟了波纹板芯体单元的屈曲变形, 主要原因是泡沫铝的填充给予了金属波纹板芯体单元充足的横向支撑使得其塑性铰的产生更加困难, 从而抑制了其塑性屈曲变形行为的发生。

(2) 泡沫铝填充波纹板其峰值应力远大于泡沫铝与空心波纹板二者的应力之和(图 2b 虚线所示)。图 2b 所示巨大的阴影区即耦合区, 说明这种新型泡沫铝填充结构不仅仅是二者的简单叠加, 而是具有明显的耦合增强效应, 这一耦合作用会产生 1+1 远大于 2 的超预期效果, 其作用机理将在后面进行进一步讨论。

(3) 当应力达到峰值时, 泡沫铝填充波纹板并不是像空心波纹板一样应力会发生迅速大幅下降从而丧失承载能力, 而是仅仅发生小幅的下降, 应力仍保持在峰值应力的 90% 以上。这说明泡沫铝填充波纹板和空心波纹板相比具有更加稳定的芯体结构。

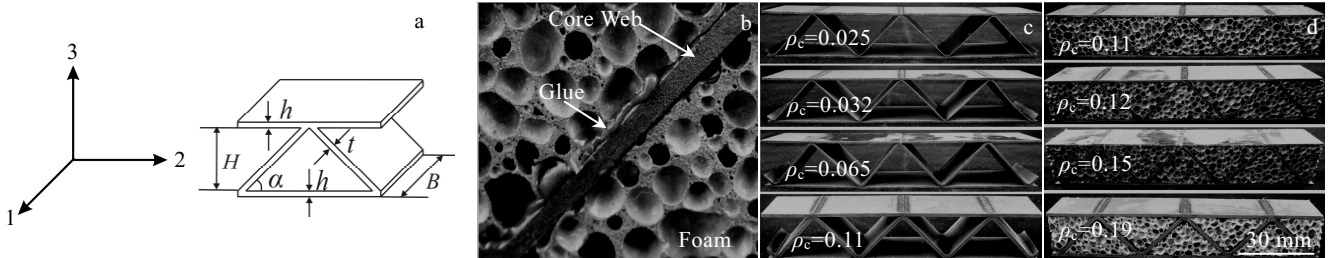


图 1 金属波纹夹芯结构

Fig.1 Sandwich structures with metallic corrugated core: (a) schematic of geometry, (b) local boundary condition, (c) empty, $\rho_c=0.11$, and (d) foam-filled, $\rho_c=0.19$

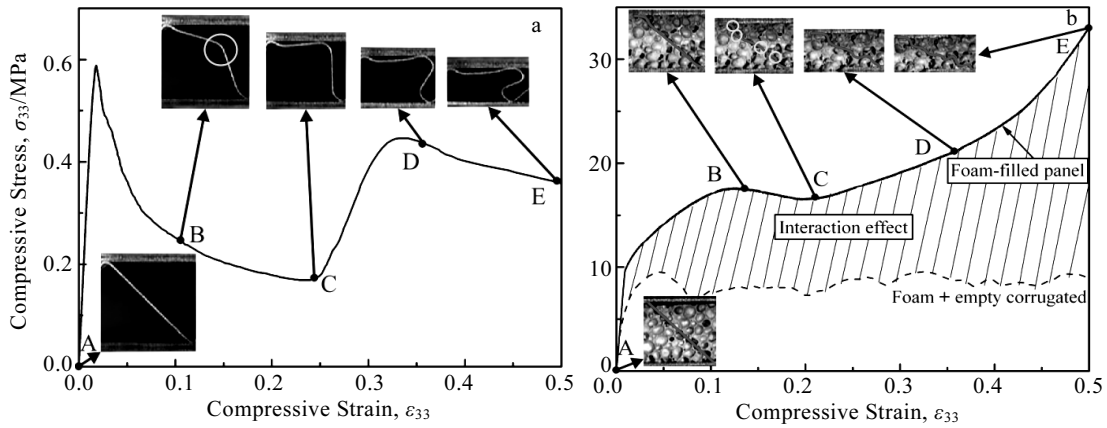


图 2 空心波纹板和泡沫铝填充波纹板的准静态压缩应力-应变曲线

Fig.2 Nominal compressive stress versus strain: (a) empty panel, $\rho_c=0.11$ and (b) foam-filled panel, $\rho_c=0.19$ (circles in yellow: plastic hinges)

(4) 泡沫铝填充波纹板芯体在应力达到峰值并经历小幅下降后又会开始缓慢上升，此时对应的应变为 30%左右，而此时应力上升的主要原因是泡沫铝开始起主导作用，泡沫铝局部发生破坏并被压至密实从而导致应力的上升。而空心波纹板此时应力的上升则是由于波纹芯体单元与面板的接触所致(图 2a 中 C 点)，因此空心波纹板此时的应力上升要比泡沫铝填充波纹板快得多；由于泡沫铝的主导作用，泡沫铝填充波纹板在后屈曲阶段仍然维持在高的应力水平，这是其能量吸收效率大幅提高的主要原因。

2.2 峰值强度及能量吸收

为了更好地定量表征泡沫铝填充波纹板在承载及能量吸收方面的性能优势，下面分别对其单位质量峰值压缩强度、单位体积能量吸收及单位质量能量吸收进行表征。

单位质量峰值压缩强度由峰值抗压缩应力 σ_{33}^{Peak}

(应力出现下降的点) 采用无量纲化处理得到，定义为 $\sigma_{33}^{Peak}/(\sigma_y \rho_c)$ ，其中 ρ_c 为芯体平均相对密度， σ_y 为 304# 不锈钢的屈服应力，在此处取为 210 MPa。由于泡沫铝的填充在引起强度大幅提升的同时也会引起其密度的提高，因此通过无量纲化处理可以抵消密度的影响，可理解为单位质量峰值压缩强度或者比强度。

准静态压缩应力-应变曲线下面积的大小代表了材料能量吸收能力的大小。其单位体积吸收的能量 W_V ，定义为：

$$W_V = \int_0^{\bar{\epsilon}} \sigma d\epsilon \quad (3)$$

式中： 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 $\bar{\epsilon} = 0.5$ 。

考虑到对重量敏感的工程结构件使用过程中要求

结构尽可能地降低重量，因此对这类结构材料来说，材料的比强度及比能量吸收(单位质量能量吸收)显得尤为重要。定义材料的比能量吸收 SAE (specific energy absorption) W_m 为：

$$W_m = W_V / (\rho_c \rho_s) \quad (4)$$

式中： ρ_c 为芯体的平均相对密度， ρ_s 为不锈钢的密度 $\rho_s = 7.9 \text{ g/cm}^3$ 。

实验测量不同相对密度的空心波纹板及其对应的泡沫铝填充波纹板的峰值压缩强度、单位质量峰值压缩强度、单位体积能量吸收及单位质量能量吸收如表 1 所示。

由表 1 可以看出，泡沫铝填充波纹板与其对应的空心波纹板相比，其峰值抗压缩强度 σ_{33}^{Peak} 为空心波纹板的 3.1 至 25.5 倍，考虑到质量因素，单位质量峰值抗压缩强度 $\sigma_{33}^{Peak}/(\rho_c \sigma_y)$ 为空心波纹板的 1.8 至 6.3

倍；单位体积能量吸收 W_V 为空心波纹板的 4 至 60 倍，单位质量能量吸收 W_m 为空心波纹板的 2.3 至 14.8 倍。以泡沫铝为代表的泡沫金属由于具有很长的应力平台区，使得其具有很高的能量吸收效率，是缓冲吸能的理想材料。本研究泡沫铝填充波纹板和泡沫铝相比，其峰值抗压缩强度 σ_{33}^{Peak} 为空心铝的 1.9 至 4.4 倍，单

位质量峰值抗压缩强度 $\sigma_{33}^{Peak}/(\rho_c \sigma_y)$ 为空心铝的 1.2 至 1.7 倍；单位体积能量吸收 W_V 为空心铝的 2.1 至 4.1 倍，单位质量能量吸收 W_m 为空心铝的 1.4 至 1.6 倍。

因此，泡沫铝填充波纹板和空心波纹板及泡沫铝相比，其比强度及比能量吸收率均得到了大幅度的提高，具有很高的承载及能量吸收效率，在冲击能量吸收领域具有很大的应用潜力。

表 1 不同相对密度的空心波纹板、泡沫铝填充波纹板以及闭孔泡沫铝的峰值抗压缩强度 $\sigma_{33}^{\text{Peak}}$ 、单位质量峰值抗压缩强度 $\sigma_{33}^{\text{Peak}}/(\rho_c \sigma_y)$ 、单位体积能量吸收 W_V 及单位质量能量吸收 W_m

Table 1 Summary of $\sigma_{33}^{\text{Peak}}$, $\sigma_{33}^{\text{Peak}}/(\rho_c \sigma_y)$, W_V and W_m of empty and aluminum foam-filled sandwich structures with metallic corrugated cores, as well as aluminum foam for comparison

ρ_c		$\sigma_{33}^{\text{Peak}} / \text{MPa}$		$\sigma_{33}^{\text{Peak}} / (\rho_c \sigma_y)$		$W_V / 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$		$W_m / \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	
Empty	Filled	Empty	Filled	Empty	Filled	Empty	Filled	Empty	Filled
0.025	0.11	0.69	17.6	0.13	0.82	0.16	9.65	0.8	11.82
0.032	0.12	1.05	23	0.16	1.01	0.32	12.49	1.23	13.94
0.065	0.15	5.97	33.7	0.44	1.11	1.61	16.08	3.09	13.96
0.11	0.19	13.37	41.7	0.57	1.04	4.71	18.79	5.35	12.36
Aluminum foam, 0.24		9.5		0.66		4.59		8.5	

3 泡沫铝填充波纹板增强机理分析

研究表明，金属点阵结构填充聚合物泡沫后，也能够一定程度上增加其压缩强度及能量吸收效率，但其强度及能量吸收效率接近于二者的简单叠加^[9,20]，并没有本研究所描述的耦合增强效应存在，因此聚合物泡沫对金属点阵结构的强度及能量吸收的贡献非常有限。主要原因在于聚合物泡沫与金属泡沫及金属点阵结构相比具有非常低的强度及刚度，其提供给金属点阵芯体单元的横向支撑作用力有限，不足以改变金属点阵芯体单元的变形模式。和聚合物泡沫填充金属点阵相比，泡沫铝填充金属圆管结构则具有类似于本研究泡沫铝填充金属波纹板的复合效应及耦合特性。研究表明，泡沫铝填充金属圆管具有的轴向压缩强度及能量吸收效率要远高于泡沫铝及金属圆管二者单独压缩之和^[1,15,21]，原因在于泡沫铝的填充改变了空心圆管的变形模式，使得其屈曲波长变短，压缩过程中产生的褶皱数目变多，而这一现象的产生则需要更大的载荷，因此具有更高的强度及能量吸收效率。本研究提出的泡沫铝填充波纹板其增强机理则与之类似。

图 2 中试样图所示为实验观测空心及泡沫铝填充波纹板应力-应变曲线上不同应变点的变形图片，由实验拍摄的视频得到。由图可以看出，对于空心波纹板，其屈曲变形过程中产生一个明显的塑性铰（如图 2a 中 B 点对应图片），但对于泡沫铝填充波纹板，其塑性铰的数目可以达到多个（如图 2b 中 C 点对应图片）。这也说明泡沫铝填充波纹板产生耦合增强的原因在于泡沫铝的填充使得波纹芯体单元发生塑性屈曲难度增大，只能随着载荷的进一步增加，进而转向更为高阶的屈曲变形模式，而在此之前，波纹芯体则是一个纯压缩过程，载荷随着压缩的进行不断增大。另外可以看出，泡沫铝填充波纹板达到峰值应力对应的应变也要远高于空心波纹板，这说明泡沫铝的填充增强空心波纹板的同时，也推迟了应力峰值的出现，也在一定程度上提高了其能量吸收效率。

为更好地对泡沫铝填充波纹板的增强机理进行研究，本研究对空心波纹板的抗压缩强度进行了理论预测。对于空心波纹板，其芯体单元的峰值抗压缩强度 $\sigma_{33}^{\text{Peak}}$ 可表示为^[22]：

$$\sigma_{33}^{\text{Peak}} = \sigma_c \rho_c \sin^2 \alpha \tag{5}$$

其中， σ_c 为波纹芯体单元的最大压缩应力，可由矩形薄板的弹塑性屈曲理论^[22]得出，采用对边简支，另外两边自由的边界条件，可表述为：

$$\sigma_c = \begin{cases} \frac{m^2 \pi^2 E \sin^2 \alpha}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{H}\right)^2, & \text{if } \frac{t}{H} < \sqrt{\frac{12\sigma_y(1-\nu^2)}{m^2 \pi^2 E \sin^2 \alpha}} \\ \frac{m^2 \pi^2 E_c \sin^2 \alpha}{12} \left(\frac{t}{H}\right)^2 + \sigma_y, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{6}$$

式中： m 为简支及固支条件下的屈曲模式阶数； E 为 304# 不锈钢的弹性模量； ν 为 304# 不锈钢的泊松比； σ_y 为 304# 不锈钢的屈服强度；其中 E_c 为结构的有效刚度^[22]，即：

$$E_c = \frac{1/E_t + (1-2\nu)/3E}{3/4E_t + (1-2\nu)/E} E_t \tag{7}$$

式中： E_t 为 304# 不锈钢的切线模量 $E_t = d\sigma/d\varepsilon$ 。

图 3 中虚线所示为由上述公式理论预测得到的空心波纹板单位质量峰值抗压缩强度 $\sigma_{33}^{\text{Peak}}/(\rho_c \sigma_y)$ 随其平均相对密度 ρ_c 的变化。不同曲线表示空心波纹板芯体的不同屈曲变形模式， m 表示其屈曲变形阶数，通常其取值为 1 和 2，分别对应于简支及固支边界条件。由图可以看出，空心波纹板准静态压缩其芯体峰值强度实验结果位于 $m=1$ 与 $m=2$ 之间，这符合实验过程中波纹芯体单元边界条件为简支和固支双重边界条件。

图 3 中 $m=3$ 与 $m=4$ 两条线对应于空心金属波纹板芯体单元更高阶的屈曲变形模式，其屈曲变形波长更短，这种变形模式在空心波纹板准静态压缩过程中并不会出现。但对于泡沫铝填充波纹板，由于泡沫铝给予波纹芯体单元足够的横向支撑，使得其中的波

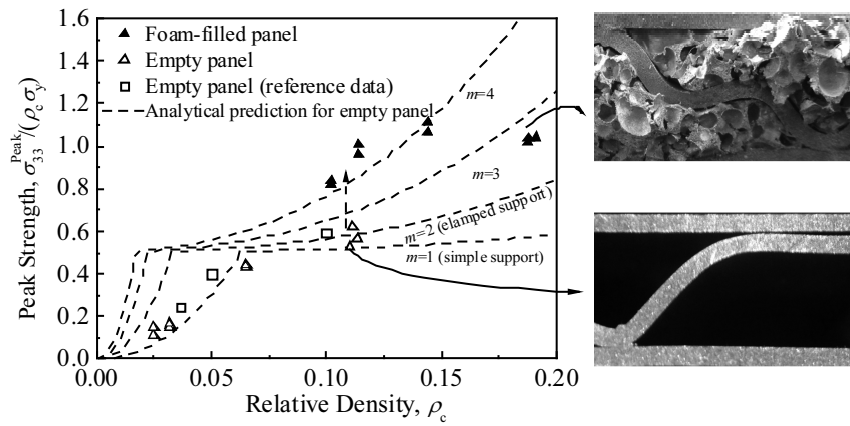


图 3 泡沫铝填充波纹板及空心波纹板峰值抗压缩强度对比

Fig.3 Comparison of experimental measurements and analytical predictions of empty sandwich panels with corrugated cores, as well as experimental data of foam-filled panels^[23] (m signifies the order of bulking model for core plate members)

纹芯体单元发生更高阶的屈曲变形成为可能，即 $m=3$ 与 $m=4$ 对于泡沫铝填充波纹板中的波纹芯体单元是可以发生的。由图 3 右侧试样的变形图可以明显看出，泡沫铝填充波纹板和空心波纹板芯体单元相比，变形模式发生了明显改变，其塑性铰数目明显增多，屈曲波长变短，也就是说其中波纹芯体单元发生了空心波纹芯体单元不可能发生的更为高阶的屈曲变形模式。因此可以说，泡沫铝填充波纹板中的芯体单元和空心波纹板中的芯体单元相比，由于其压缩过程中具有更高的屈曲变形模式，因此具有更高的强度。这一耦合增强机理与实验观测到的变形模式的转变一致，且与泡沫铝填充金属圆管的耦合机理一致^[7,8]。

泡沫铝的填充对于空心波纹板有两方面的作用：一是利用泡沫铝本身具有良好的吸能特性，来提高空心波纹板的强度及能量吸收效率；二是利用泡沫铝对空心波纹板芯体单元的横向支撑使得其屈曲变形模式转变为更为高阶的屈曲变形模式，使得其中的波纹板芯体单元在压缩载荷作用下本身承受的载荷及吸收的能量增多，即泡沫铝和波纹芯体单元之间的相互耦合作用。

由图 4 聚合物泡沫填充铝蜂窝的压缩应力随相对密度的变化曲线^[10]可以看出，聚合物泡沫的填充虽然显著提高了铝蜂窝的抗压缩强度，但其和相同密度的蜂窝相比并不具有性能优势，甚至聚合物泡沫的填充其增强效应并没有蜂窝相对密度的增加导致的增强效应显著。而对于泡沫铝填充波纹板，图 3 中向上的虚线箭头表明即使在相同密度下，泡沫铝填充波纹板的峰值压缩强度仍然远高于空心波纹板，也就是说，通过填充泡沫铝来提高金属波纹板强度的方法比通过增加其相对密度的方法更加有效。

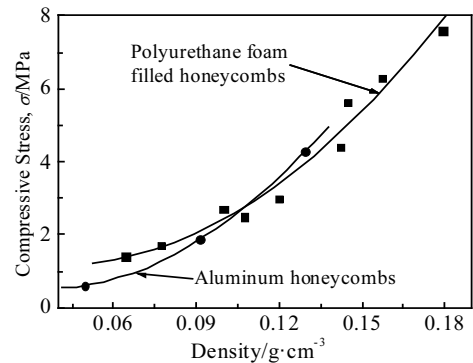


图 4 聚合物泡沫填充铝蜂窝及空心铝蜂窝准静态压缩应力与密度关系

Fig.4 Compressive stress of empty and polyurethane foam-filled honeycombs with different densities^[10]

4 结论

- 1) 泡沫铝填充波纹板与其对应的空心波纹板相比，强度及能量吸收效率均得到了显著提高，其压缩应力比二者单独测量得到的应力之和还要高，具有明显的耦合增强效应。
- 2) 泡沫铝填充金属波纹板的比强度可达到其对应空心结构的 6.3 倍，而单位质量能量吸收(SEA)则高达 14.8 倍，即使和泡沫铝这种缓冲吸能的理想材料相比，其单位质量能量吸收仍可提高 50% 以上。
- 3) 泡沫铝的填充给予了波纹芯体单元足够强的横向支撑，使其在压缩过程中的屈曲模式转变为空心结构

所不能发生的更高阶的屈曲变形模式，屈曲波长变短，发生屈曲所需载荷增大，从而产生耦合增强效应。

参考文献 References

- [1] Evans A G, Hutchinson J W, Fleck N A *et al.* *Progress in Materials Science*[J], 2001, 46(3-4): 309
- [2] Banhart J. *Progress in Materials Science*[J], 2001, 46(6): 559
- [3] Kang Xinting(康新婷), Tang Huiping(汤慧萍), Wang Jianyong (王建永) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2011, 40(10): 1732
- [4] Zhang Wenyan(张文彦), Xi Zhengping(奚正平), Fang Ming(方明) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2008, 37(7): 1129
- [5] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids: Structure and Properties, Second Edition*[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 1997
- [6] Wadley H N G, Fleck N A, Evans A G. *Composites Science and Technology*[J], 2003, 63(16): 2331
- [7] 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
- [8] Jeon I, Asahina T. *Acta Materialia*[J], 2005, 53(12): 3415
- [9] Vaziri A, Xue Z Y, Hutchinson J W. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*[J], 2006, 1(1): 97
- [10] Nia A A, Sadeghi M Z. *Materials & Design*[J], 2010, 31(3): 1216
- [11] Mahmoudabadi M Z, Sadighi M. *Materials Science and Engineering A - Structural Materials Properties Microstructure and Processing*[J], 2011, 530: 333
- [12] Zhang J, Supernak P, Mueller-Alander S *et al.* *Materials & Design*[J], 2013, 50: 767
- [13] Ostos J B, Rinaldi R G, Hammetter C M *et al.* *Acta Materialia* [J], 2012, 60(19): 6476
- [14] Zhang C J, Feng Y, Zhang X B. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2010, 20(8): 1380
- [15] Rajendran R, Sai K P, Chandrasekar B *et al.* *Materials & Design*[J], 2009, 30(5): 1777
- [16] Yan L L, Yu B, Han B *et al.* *Composites Science and Technology*[J]. 2013; 86: 142
- [17] Yan L L, Han B, Yu B *et al.* *Materials & Design* [J], 2014, 60: 510
- [18] Styles M, Compston P, Kalyanasundaram S. *Composite Structures*[J], 2007, 80(4): 532
- [19] Zu G Y, Song B N, Zhong Z Y *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2012, 540: 275
- [20] Burlayenko V N, Sadowski T. *Composite Structures*[J], 2010, 92 (12): 2890
- [21] Asavavisithchai S, Slater D, Kennedy A R. *Journal of Materials Science*[J], 2004, 39(24): 7395
- [22] Chen T Y, Shen S H. *Buckling of Structures*[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press, 1993
- [23] Cote F, Deshpande V S, Fleck N A *et al.* *International Journal of Solids and Structures*[J], 2006, 43(20): 6220

Coupling Enhancement Mechanism of Aluminum Foam-Filled Metallic Corrugated Sandwich Panels

Yan Leilei^{1,3}, Zhao Xue¹, Zhao Jingbo¹, Li Binchao², Zhang Qiancheng³, Lu Tianjian³

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

(2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

(3. MOE Key Laboratory for Multifunctional Materials and Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aluminum foam-filled corrugated sandwich panels were fabricated by filling closed cell aluminum foam into the spaces of empty corrugated cores, and their out-of-plane compressive behaviors were investigated experimentally. Results show that the compressive stress of the aluminum foam-filled corrugated sandwich panels is much higher than the compressive stress sum of aluminum foam and empty corrugated panel. Thus the foam-filled corrugated sandwich panel exhibits significant coupling enhancement effects. The peak stress per unit mass and specific energy absorption (SEA) of the foam-filled panels could be as large as 6.3 and 14.8 times, respectively, compared to that of the corresponding empty one. Compared to aluminum foam which has excellent energy absorption performances, SEA of the foam-filled corrugated sandwich panel increases by 50%. Peak compressive strength of corrugated panels varying with relative density was predicted theoretically. It is shown that the buckling model of the corrugated core web changes from low order to high order due to foam filling. The high order has shorter wavelength compared to the lower one and requires much larger compressive load; therefore, a significant coupling enhancement effect is caused.

Key words: metallic foam; corrugated panel; stress-strain curve; coupling enhancement; buckling

Corresponding author: Yan Leilei, Ph. D., Lecturer, Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, P. R. China, Tel: 0086-29-84786557, E-mail: rayll@stu.xjtu.edu.cn