

# 多层金属多孔复合结构面外压缩吸能特性实验

赵 雪<sup>1</sup>, 闫雷雷<sup>1,2✉</sup>, 卢天健<sup>2,3</sup>, 常 青<sup>4</sup>

(1. 空军工程大学理学院, 西安, 710051; 2. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安, 710049;  
3. 西安交通大学多功能材料和结构教育部重点实验室, 西安, 710049; 4. 西安市建筑设计研究院, 西安, 710054)

**摘要** 轻量化及多功能一体化设计成为武器装备性能提升的迫切目标需求, 以金属点阵和金属泡沫为代表的金属多孔材料由于具有超轻、超强、高能量吸收率及多功能可设计性等优点得到了广泛的重视, 但金属点阵结构的屈曲及泡沫金属的低强度问题成为制约其工程应用的瓶颈。通过将泡沫金属填充到金属点阵孔隙中的方法获得 3 种不同几何构型的多层金属多孔复合结构——泡沫铝填充双层金属波纹板, 并对其承载及能量吸收特性进行了面外压缩实验研究。研究表明新型金属多孔复合结构单位质量峰值压缩强度及单位质量能量吸收可分别高达其对应的空心结构的 9.3 及 21.8 倍, 甚至和泡沫铝这一优异吸能材料相比仍可分别提高 19% 和 20%。耦合增强机理表明正是泡沫铝的填充改变了波纹芯体的屈曲变形模式, 使其转化为更为复杂高阶的屈曲变形模式, 产生耦合增强效应, 从而引起强度及能量吸收效率的大幅提升。

**关键词** 多孔复合结构; 泡沫金属; 面外压缩; 应力应变; 能量吸收

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.04.006

**中图分类号** V25;O3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)04-0028-06

## An Experimental Investigation on Energy Absorption of Multi-layer Sandwich Structures with Metallic Corrugated Cores under Out-of-plane Compressive Load

ZHAO Xue<sup>1</sup>, YAN Leilei<sup>1,2</sup>, LU Tianjian<sup>2,3</sup>, CHANG Qing<sup>4</sup>

(1. Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
3. MOE Key Laboratory for Multifunctional Materials and Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. Xi'an Architectural Design-Research Institute, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Lightweight and multi-functional design become the urgent needs of our army weapons and equipment. Taking metallic foam and lattice structures as representative, these materials are characterized by ultra-light and high energy absorption efficiency. However, core web buckling of metal lattice core and low strength of the metallic foam critically limit their engineering applications. In this paper, multi-layer metallic sandwich structures with empty and aluminum foam-filled corrugated cores of three different configurations are obtained by filling aluminum foam into the space of the corrugated cores, and their load car-

**收稿日期:** 2017-01-18

**基金项目:** 国家自然科学基金(51601221, 11504429); 机械结构强度与振动国家重点实验室开放课题(SV2016-KF-22)

**作者简介:** 赵 雪(1986—), 女, 陕西西安人, 助教, 硕士, 主要从事金属多孔材料力学行为研究. E-mail: zhaoxue1228@163.com

**通信作者:** 闫雷雷(1985—), 男, 讲师, 博士, 主要从事超轻多孔材料制备及多功能特性研究. E-mail: rayyll@stu.xjtu.edu.cn

**引用格式:** 赵雪, 闫雷雷, 卢天健, 等. 多层金属多孔复合结构面外压缩吸能特性实验 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(4): 28-33. ZHAO Xue, YAN Leilei, LU Tianjian, et al. An Experimental Investigation on Energy Absorption of Multi-layer Sandwich Structures with Metallic Corrugated Cores under Out-of-plane Compressive Load [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(4): 28-33.

rying and energy absorption capabilities are experimentally studied under out-of-plane compressive load. The results show that the peak compressive strength and specific energy absorption of the foam-filled panels can be 9.3 and 21.8 times as high as those of the empty panels, and even increase by 19% and 20% compared with aluminum foam respectively. The coupling enhancement mechanism indicates that the filling of the aluminum foam transforms the buckling mode of the corrugated core member into a high-order one, resulting in a substantial increase in strength and energy absorption efficiency. The excellent performance in load carrying and energy absorption of the novel sandwich structure with hybrid core make it competitive in integrative design of light weight structures.

**Key words:** hybrid core; metallic foam; compressive; stress strain curve; energy absorption

科学技术的进步和国防科技事业的发展,以及日趋紧张的国内外形势对我国武器装备的综合性能提出了更高的要求。其中在轻量化设计的基础上集承载、吸能、隐身及热防护等多功能一体化成为迫切的目标需求<sup>[1-3]</sup>。以金属点阵及泡沫金属为代表的金属多孔材料具有超轻、超强(高比强度/刚度)、高能量吸收率及多功能可设计性等优点<sup>[4-5]</sup>,同时泡沫金属还具备一定的电磁屏蔽、隔热、隔声等特性<sup>[5-7]</sup>,在航天航空武器装备领域具有广泛的应用前景。

但金属点阵结构在峰值载荷作用下其芯体单元会发生突然的屈曲变形从而丧失承载能力<sup>[8]</sup>,而泡沫金属则具有相对低的强度<sup>[9-10]</sup>,工程应用更多侧重于其功能特性。因此抑制金属点阵芯体单元的屈曲行为及提高泡沫金属的强度成为国内外力学及材料学家研究的重点。近年来,利用混杂设计思想设计复合结构引起了国内外学者的高度重视,希望通过二者的复合获得一种综合性能更加优异的材料。闫雷雷等人对泡沫铝填充金属波纹板的静态压缩<sup>[11]</sup>、弯曲<sup>[12]</sup>等力学行为进行了系统实验、数值及理论预测研究,研究表明通过泡沫铝的填充可以有效抑制金属点阵芯体单元的屈曲,使得其强度及能量吸收率得到了成倍提高,同时还对其耦合增强机理进行了详细分析<sup>[11,13]</sup>;于勃等人通过数值分析方法研究了其不同冲击速率下的力学行为<sup>[14-15]</sup>,发现其为强化效应与惯性效应共同主导的结果<sup>[14]</sup>。

而通过聚合物泡沫填充金属点阵结构的研究发现其并不能提高芯体的抗冲击性能<sup>[16-17]</sup>,原因在于聚合物泡沫和金属点阵芯体相比强度较低,对其屈曲变形行为的抑制作用不够显著,但聚合物泡沫填充复合材料点阵芯体的研究则发现其仍然能够抑制点阵芯体的屈曲行为,从而提高其承载能力<sup>[18-20]</sup>。对于提高多层金属点阵结构的抗屈曲性能进而提高其承载及能量吸收能力目前鲜有报导。

考虑加工制备简单,从经济性角度考虑通过将泡沫铝填充到 3 种不同几何构型的双层金属波纹板芯体孔隙中的方法获得一种新型多层金属多孔复合

结构,即泡沫铝填充双层金属波纹板,拟通过泡沫铝的填充提高抗屈曲能力及能量吸收性能。对所制备的试样通过面外压缩性能实验对其单位质量峰值强度及能量吸收性能进行表征,对其承载及吸能特性进行研究。

## 1 实验

实验所用金属泡沫为球形孔闭孔金属泡沫铝,由东南大学何德平教授课题组通过熔体发泡法制备获得,泡沫铝为相对密度  $\rho_f = 0.24$  的脆性泡沫,孔径为 1~3 mm,准静态压缩性能测试试样尺寸为  $\Phi 35 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ ,每个尺度上至少包含 7 个以上孔隙。双层金属波纹板其面板及芯体材料均为厚度  $t = 0.41 \text{ mm}$  的 304 # 不锈钢,密度为  $\rho_s = 7900 \text{ kg/m}^3$ 。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  $B = 20 \text{ mm}$ ,所有测试试样均取 2 个胞元进行研究。

空心双层金属波纹板与泡沫铝填充双层金属波纹板其制备工艺过程与单层金属波纹板类似,均采用激光焊接获得<sup>[11]</sup>,不同的是此处双层金属波纹板结构与单层波纹板相比更复杂,焊接过程中需要将芯体与芯体、芯体与面板逐层焊接获得。需要注意的是单层波纹板只有一种几何构型,而双层波纹板则由于不同层之间排列分布不同可分为多种几何构型,本文对图 1 的 3 种不同几何构型的空心双层金属波纹板及其泡沫铝填充结构进行研究。制备所得不同几何构型的空心及泡沫铝填充双层金属波纹板准静态压缩试样见图 1。其中芯体的相对密度  $\rho_r$  定义为芯体密度  $\rho$  与不锈钢密度  $\rho_s$  之比。

实验通过西安交通大学强度与振动国家重点实验室 MTS 实验加载系统完成。实验过程中加载速率控制为 1 mm/min,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整个实验过程进行录像,便于对其破坏模式进行分析。为获得试样完整的面

外压缩性能,每一试样的压缩应变都达到60%以上。所有试样在实验过程中均未出现脱焊现象,显示了试样的良好焊接效果。

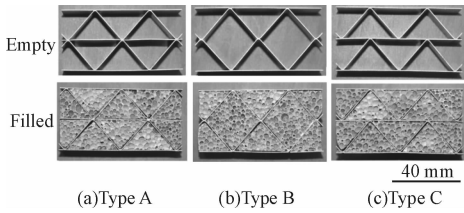


图1 不同几何构型的空心及泡沫铝填充双层金属波纹板  
Fig. 1 Different configurations of empty and aluminum foam-filled multi-layer sandwich structures

## 2 实验结果分析

### 2.1 应力应变曲线分析

图2为填充用闭孔泡沫铝准静态压缩应力应变曲线,包含线弹性区、平台区及密实化区3个典型区域,为泡沫金属的典型应力应变曲线。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。

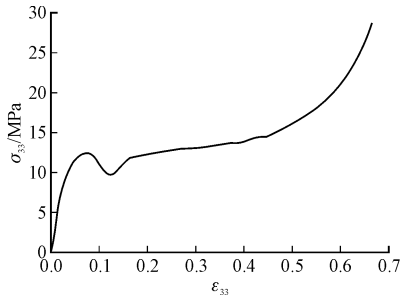


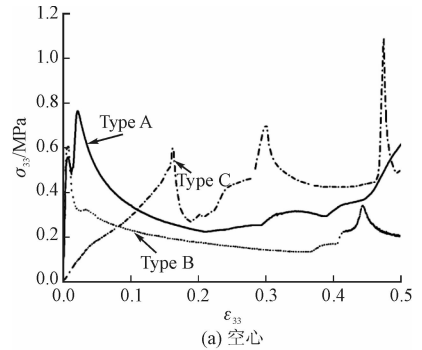
图2 泡沫铝应力应变曲线

Fig. 2 Nominal compressive stress versus strain curve of aluminum foam

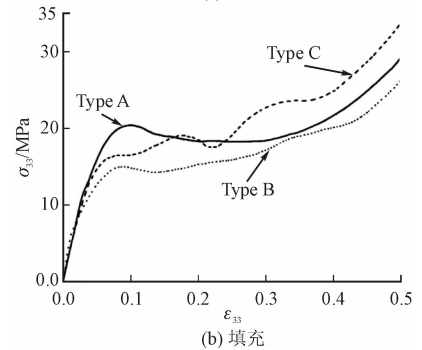
图3为3种不同几何构型的空心及泡沫铝填充双层金属波纹板准静态压缩应力应变曲线,图4为其不同压缩应变下的变形形貌,反映其芯体结构随着应变的增加的变化特征。由空心及泡沫铝填充结构的应力应变曲线及变形形貌可以看出:

1)对于空心双层金属波纹板,Type A与Type B准静态压缩曲线与单层波纹板类似,均在一个明显的线弹性加载后达到应力峰值,之后载荷迅速发生大幅下降,直至面板与芯体单元发生接触。由图4(a)-1、(b)-1的变形形貌可以看出对于这2种结构,应力达到峰值后的破坏主要是由于( $\epsilon=0.05$ 对应图片所示)波纹芯体单元发生屈曲所致。波纹芯体单元发生屈曲变形导致两种结构应力达到峰值后迅速发生大幅下降,大大降低了Type A、Type B空心波纹板的能量吸收能力。这两种结构的主要区别

是Type A多了一层中间的面板,因此这两种结构从本质上来说准静态压缩过程应该完全相同,只是由于试样Type A中间层比较薄,加载过程中间层会受到一定的变形影响,从而导致Type A、Type B应力应变曲线产生差异。



(a) 空心



(b) 填充

图3 准静态压缩应力应变曲线

Fig. 3 Compressive stress strain curve of multi-layer sandwich structures

对于Type C结构,其应力应变曲线则与Type A、Type B有着明显不同,其应力在经历一个短暂的线弹性上升后便进入一个非线性上升区,随后应力达到峰值并在此之后发生迅速下降。由图4(c)-1的变形形貌可以看出,在初始加载阶段,Type C中间层面板两条焊缝之间相当于承受一个3点弯曲载荷,因此在这一阶段其刚度要显著低于Type A与Type B的压缩载荷作用,当应力达到面板的屈服应力时,应力应变曲线的线弹性段转化为非线性上升,直至波纹芯体单元发生屈曲变形,此时应力达到峰值。此后由于芯体单元的屈曲变形,应力会迅速发生大幅下降。随着应变的进一步增大,波纹芯体单元与上下2层面板及中间层面板发生接触并相互影响,应力应变曲线变得更为复杂,应力会反复出现上升及下降。

3种不同结构的双层空心波纹板其应力峰值均在波纹芯体单元发生屈曲变形后产生,此后由于波纹芯体单元发生屈曲变形产生软化,其应力均会发生大幅迅速下降。波纹芯体单元这一屈曲变形的产生使3种空心结构承载及能量吸收性能大大降低,这严重制约着其作为工程结构件的使用。

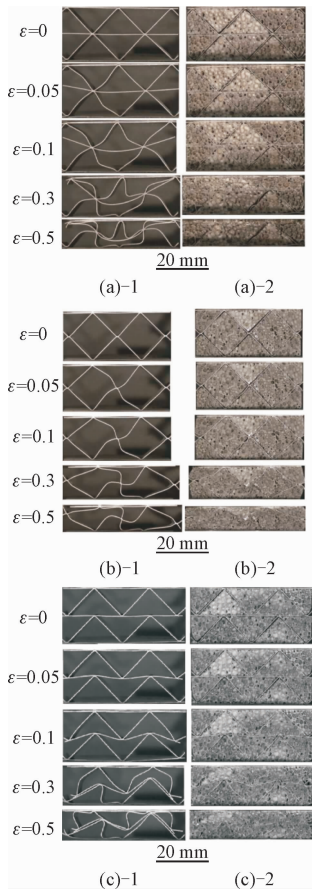


图 4 空心及泡沫铝填充双层金属波纹板在不同应变下的变形形貌

Fig. 4 Deformation histories of empty and aluminum foam-filled multi-layer sandwich structures

2)对于图 3(b)可以看出 3 种不同构型泡沫铝填充双层金属波纹板其应力应变曲线非常相似。其峰值强度可高达 20 MPa 以上,而空心波纹板则不超过 0.8 MPa,同时泡沫铝填充结构也没有出现类似空心波纹板的芯体单元屈曲而导致应力的大幅下降从而影响能量吸收效率,而是出现类似泡沫铝的平台区域,说明泡沫铝的填充极大的提高了波纹芯体单元的屈曲稳定性,使得其具有非常优异的能量吸收特性。

由图 4(a)-2、(b)-2、(c)-2 对应的变形形貌可以看出,3 种不同几何构型的泡沫铝填充双层金属波纹板其波纹芯体单元的变形均变得更为复杂,表现为多个塑性铰的产生,而不是对应空心波纹板的单个塑性铰的产生。这与单层金属波纹板类似,即除了泡沫铝本身对强度及能量吸收的贡献,泡沫铝与波纹芯体单元之间的相互耦合作用使得波纹芯体单元本身具有更高的强度及能量吸收特性,其耦合机理与单层波纹板类似<sup>[11]</sup>。

另外,3 种空心波纹板应力应变曲线表现出了明显的差异,但对应的泡沫铝填充结构则比较类似,

表现出类似泡沫金属的应力应变特征,显示出泡沫铝填充结构具有良好的能量吸收效果。同时也说明泡沫铝的填充改变了波纹芯体单元的稳定性,从而使得其应力应变曲线离散性更小,几何构型对其影响作用大大减弱。

## 2.2 单位质量峰值强度及能量吸收

为了更好的定量表征泡沫铝填充双层金属波纹板的承载及能量吸收能力,下面分别对 3 种不同几何构型的空心及泡沫铝填充波纹板的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:

1)峰值压缩强度。无量纲化的峰值压缩强度定义为  $\sigma_{33}^{Peak} / (\sigma_y \rho_c)$ ,是由峰值压缩强度  $\sigma_{33}^{Peak}$  采用无量纲化处理得到的。其中  $\rho_c$  为芯体平均相对密度,  $\sigma_y$  为 304 不锈钢的屈服应力,此处  $\sigma_y = 210$  MPa。这一无量纲化处理可以抵消泡沫铝填充波纹板由于泡沫铝的填充在引起强度大幅提升的同时也引起了其密度的提高,可理解为单位质量峰值压缩强度或者比强度。

2)单位体积能量吸收。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:

$$W_V = \int_0^{\bar{\epsilon}} \sigma d\epsilon \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为结构芯体的压缩应力,  $\epsilon$  为结构芯体的压缩应变,  $\bar{\epsilon}$  为应变的积分上限,取值 0.5。

3)单位质量能量吸收。考虑有些对重量敏感的工程结构件在使用过程中要求结构尽可能的减小重量,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:

$$W_m = W_V / \rho \quad (2)$$

实验测量 3 种几何构型的空心及泡沫铝填充双层波纹板的  $\sigma_{33}^{Peak}$ 、 $\sigma_{33}^{Peak} / (\sigma_y \rho_c)$ 、 $W_V$  及单  $W_m$  见表 1。图 5 为空心 and 泡沫铝填充双层金属波纹板以及填充所用泡沫铝单位体积能量吸收随着应变的变化曲线。

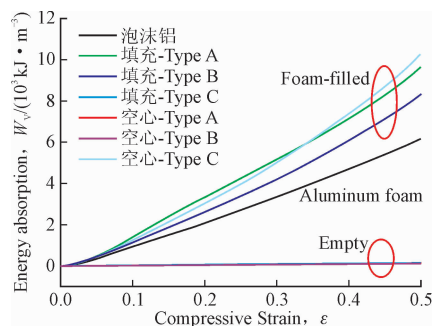


图 5 单位体积能量吸收  $W_V$  随应变的变化曲线

Fig. 5 Energy absorption per volume versus compressive strain

由图5可以看出泡沫铝填充双层波纹板的吸能效率要明显高于泡沫铝这一公认的优异吸能材料,而对空心结构的吸能效率相比则几乎可以忽略。由表1可以看出,3种结构的泡沫铝填充结构与其对应的空心结构相比,峰值压缩强度分别为其26.9、24.6、31.9倍,单位质量峰值压缩强度分别为其8.0、7.1、9.3倍,单位体积能量吸收率分别为其56.5、75.7、51.5倍,单位质量能量吸收分别为其

表1 空心及泡沫铝填充双层波纹板准静态压缩实验数据对比。

Tab. 1 Empty and aluminum foam-filled double sandwich structures with three configurations

实验内容	空心-A	空心-B	空心-C	泡沫铝	填充-A	填充-B	填充-C
$\rho_c$	0.032	0.032	0.032	0.08	0.11	0.11	0.11
$\sigma_{33}^{\text{Peak}}/\text{MPa}$	0.76	0.61	0.60	12.49	20.41	15.03	19.12
$\sigma_{33}^{\text{Peak}}/\sigma_y\rho_c$	0.11	0.091	0.089	0.74	0.88	0.65	0.83
$W_V/10^3 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$	0.17	0.11	0.20	6.17	9.60	8.33	10.29
$W_m/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.67	0.44	0.79	9.88	11.05	9.59	11.84

新型多层金属多孔复合结构承载及吸能效率的大幅度提升,一方面得益于泡沫金属的优异吸能特性,另一方面在于泡沫铝与波纹芯体单元之间的耦合增强作用,其增强机理与泡沫铝填充单层金属波纹板类似<sup>[11]</sup>,即泡沫铝的填充给予了波纹芯体单元足够强的横向支撑,从而抑制了其达到峰值载荷时的屈曲变形行为,从而转化为一种空心结构很难发生的更为复杂更为高阶的屈曲变形模式,而这一复杂屈曲变形模式的发生需要在更大的载荷作用下完成,从而造成应力应变曲线的大幅提升,进而引起强度及能量吸收效率的增加。

### 3 结语

本文通过线切割、激光焊接、填充、粘接等手段制备获得了3种不同几何构型的新型多层金属多孔复合结构,采用准静态面外压缩实验对其承载及吸能特性进行了实验研究。研究表明新型复合结构的峰值压缩强度、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可分别高达其对应空心结构的31.9、9.3、75.7、21.8倍,甚至和泡沫铝这一优异吸能材料相比其单位质量峰值压缩强度及单位质量能量吸收率仍可分别提高19%及20%以上,表现出了明显的耦合增强效应,耦合增强机理为泡沫铝的填充改变了波纹芯体单元的屈曲变形模式,使得其转化为空心结构难以发生的更为复杂高阶的屈曲变形模式。

新型多层金属多孔复合结构承载及吸能方面的优异表现,将使得其作为一种轻质结构功能一体化

17.2、21.8、15倍,峰值强 $\sigma_{33}^{\text{Peak}}/(\sigma_y\rho_c)$ 、单位体积能量吸收 $W_V$ 及单位质量能量吸收 $W_m$ 均得到了数倍甚至数十倍的提升,甚至和泡沫铝相比其单位质量峰值强度及单位质量能量吸收仍可分别提高19%和20%以上,新型金属多孔复合结构表现出优异的承载及能量吸收特性,可作为结构功能一体化材料设计应用。

材料在冲击能量吸收领域具有广泛的应用前景。

### 参考文献(References):

- [1] 陈立明,戴政,谷宇,等. 轻质多层热防护结构的一体化优化设计研究[J]. 力学学报, 2011, 43(2): 289-295.  
CHENG L M, DAI Z, GU Y, et al. Integrated Optimization Design of Light-Weight Multilayer Thermal Protection Structures [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 43(2): 289-295. (in Chinese)
- [2] 吴林志,熊健,马力,等. 轻质夹层多功能结构一体化设计[J]. 力学与实践, 2012, 34(4): 8-18.  
WU L Z, XIONG J, MA L, et al. Integrated Design of Lightweight Multifunctional Sandwich Structures [J]. Mechanics in Engineering, 2012, 34(4): 8-18. (in Chinese)
- [3] 王琪,吉庭武,谢公南,等. 轻质热防护系统波纹夹芯结构热力耦合分析[J]. 应用数学和力学, 2013, 34(2): 172-182.  
WANG Q, JI T W, XIE G N, et al. Structural Analysis of Corrugated-Core Sandwich Panels for Lightweight Thermal Protection System [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2013, 34(2): 172-182. (in Chinese)
- [4] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties [M]. Second Edition Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [5] ASHBY M F, EVANS T, FLECK N A, et al. Metal Foams: A Design Guide [M]. Amsterdam: Elsevier, 2000.
- [6] 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 [J]. 力学与实践, 2015, 37(1): 1-24, 48.
- JING L, WANG Z H, ZHAO L M. Advances in Studies of the Mechanical Performance of Cellular Metals and Related Sandwich Structures [J]. Mechanics in Engineering, 2015, 37(1): 1-24, 48. (in Chinese)
- [7] YANG X H, WANG W B, YAN L L, et al. Effect of Pore Morphology on Cross-Property Link for Close-celled Metallic Foams [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(50).
- [8] 范华林, 杨卫. 轻质高弱点阵材料及其力学性能研究进展 [J]. 力学进展, 2007, 37(1): 99-112.
- FAN H L, YANG W. Development of Lattice Materials with High Specific Stiffness and Strength [J]. Advances in Mechanics, 2007, 37(1): 99-112. (in Chinese)
- [9] 张钱城, 卢天健, 何思渊, 等. 闭孔泡沫铝的孔结构控制 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(3): 255-270.
- ZHANG Q C, LU T J, He S Y, et al. Control of Pore Morphology in Close-Celled Aluminum Foams [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(3): 255-270. (in Chinese)
- [10] JEON I, ASAHINA T. The Effect of structural Defects on the Compressive Behavior of Closed-Cell Al Foam [J]. Acta Materialia, 2005, 53(12): 3415-3423.
- [11] YAN L L, YU B, HAN B, et al. Compressive Strength and Energy Absorption of Sandwich Panels with Aluminum Foam-Filled Corrugated Cores [J]. Composites Science Technology, 2013, 86: 142-148.
- [12] YAN L L, HAN B, YU B, et al. Three-Point Bending of Sandwich Beams with Aluminum Foam-Filled Corrugated Cores [J]. Materials & Design, 2014, 60: 510-519.
- [13] HAN B, YAN L L, YU B, et al. Collapse Mechanism Maps for Metal Sandwich Plates with Aluminum Foam-Filled Corrugated Cores [J]. Journal of Mechanics Materials and Structures, 2014, 9(4): 397-425.
- [14] YU B, HAN B, NI C Y, et al. Dynamic Crushing of All-Metallic Corrugated Panels Filled with Close-Celled Aluminum Foams [J]. Journal of Applied Mechanics, 2015, 82(1): 011006.
- [15] ZHANG J X, QIN Q H, WANG T J. Resistance of Metallic Foam-Filled Trapezoidal Plate Core Sandwich Plate to Blast Loading [J]. Material Research Innovations, 2011, 15(s1): 162-165.
- [16] VAZIRI A, XUE Z Y, HUTCHINSON J W. Metal Sandwich Plates with Polymer Foam-Filled Cores [J]. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2006, 1(1): 97-127.
- [17] ZHANG P, CHENG Y, LIU J, et al. Experimental Study on the Dynamic Response of Foam-Filled Corrugated Core Sandwich Panels Subjected to Air Blast Loading [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 105: 67-81.
- [18] MURAT Y, JEFFERSON W, DANIEEN B, et al. Experimental and Numerical Study of Foam Filled Corrugated Core Steel Sandwich Subjected to Blast Loading [J]. Composite Structures, 2014, 110: 98-109.
- [19] ZHANG J, SUPERNAK P, MUELLER-ALANDER S, et al. Improving the Bending Strength and Energy Absorption of Corrugated Sandwich Composite Structure [J]. Materials and Design, 2013, 50: 767-773.
- [20] OSTOS J B, RINALDI R G, HAMMETTER C M, et al. Deformation Stabilization of Lattice Structures Via Foam Addition [J]. Acta Materialia, 2012, 60(19): 6476-6485.

(编辑: 姚树峰)