

## 相对密度对球体开孔泡沫铝压缩及吸能性能的影响

王晶<sup>1</sup>, 齐明思<sup>1</sup>, 张伟<sup>2</sup>, 张纪平<sup>1</sup>, 侯晓丽<sup>1</sup>, 王志坚<sup>1</sup>

(1.中北大学, 太原 030051; 2.太原市热力集团有限责任公司, 太原 030001)

**摘要:** **目的** 研究球体开孔泡沫铝的相对密度在准静态压缩过程中对球体开孔泡沫铝压缩性能和吸能性能的影响。**方法** 对准备的3种不同相对密度的泡沫铝试样进行准静态压缩试验。**结果** 利用相关软件绘制出不同相对密度球体开孔泡沫铝试样的实验曲线, 由分析试验曲线可知, 当泡沫铝的相对密度从0.35提升到0.392时, 球体开孔泡沫铝的屈服强度虽增加了3.2 MPa, 但吸能效率的最大值下降了近2.4%。**结论** 随着泡沫铝相对密度的提高, 其压缩性能越高、抗压强度越高。在同等应变下, 高密度泡沫铝比低密度泡沫铝的吸能性能好。泡沫铝相对密度越大, 吸能效率的最大值越小, 理想吸能效率的最大值也越小。

**关键词:** 球体开孔泡沫铝; 压缩性能; 吸能效率; 理想吸能效率

中图分类号: TB484.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)21-0105-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.21.016

### Influence of Relative Density on Compression Properties and Energy Absorption of Spherical Open Cell Aluminum Foam

WANG Jing<sup>1</sup>, QI Ming-si<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, ZHANG Ji-ping<sup>1</sup>, HOU Xiao-li<sup>1</sup>, WANG Zhi-jian<sup>1</sup>

(1.North University of China, Taiyuan 030051, China; 2.Taiyuan Heating Power Group Co., Ltd., Taiyuan 030001, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effect of relative density of spherical open cell aluminum foam in the quasi-static compression process on the compression properties and energy absorption of spherical open cell aluminum foam. Quasi-static compression experiments were carried out on three prepared aluminum foam samples with different relative densities. The experimental curves of spherical open cell aluminum foam samples with different relative densities were plotted with relevant software. From the analysis of experimental curves, when the relative density of aluminum foam increased from 0.35 to 0.392, the yield strength of spherical open cell aluminum foam increased by 3.2 MPa, but the maximum energy absorption efficiency decreased by nearly 2.4%. With the increase of relative density of aluminum foam, the higher the compression properties, the higher the compressive strength. Under the same strain, the aluminum foam with higher density has better energy absorption than that with lower density. The higher the relative density of aluminum foam, the lower the maximum energy absorption efficiency and the maximum ideal energy absorption efficiency.

**KEY WORDS:** spherical open cell aluminum foam; compression property; energy absorption efficiency; ideal energy absorption efficiency

泡沫铝是由于独特的孔隙结构使得其有更加出色的物理性能, 被普遍使用于航空、航天、航海等领

域。在其众多力学性能中, 压缩性能是研究的重点和难点<sup>[1-3]</sup>。泡沫铝按照内部孔隙结构可以分成2类:

收稿日期: 2019-06-27

基金项目: 山西省自然科学基金(201601D102035)

作者简介: 王晶(1995—), 男, 中北大学硕士生, 主攻泡沫铝-聚氨酯缓冲材料。

通信作者: 齐明思(1979—), 男, 博士, 中北大学副教授, 主要研究方向为机械系统动态测试。

开孔型、闭孔型。泡沫铝内部孔隙结构如果表现为相互独立且封闭的胞孔,则为闭孔型泡沫铝;相反如果各个孔隙之间相互联通,则为开孔型泡沫铝。开孔型泡沫铝又可以分为球体型泡沫铝和不规则型泡沫铝2种类型,分类依据为内部孔隙结构和制备工艺,一般以孔径大小和孔隙率2个指标作为区分标准,文中研究的球体开孔泡沫铝就是一种开孔型泡沫铝<sup>[4-6]</sup>。内部结构不同(一般指不同泡沫铝孔径、不同孔隙率)的泡沫铝压缩性能基本不同,且压缩性能相差很大。与闭孔型泡沫铝相比,开孔型泡沫铝由于其内部各个孔之间相互贯通,在受到冲击载荷时,不会由于内部孔封闭而反弹,因此缓冲时更加容易吸收能量,进而保护仪器<sup>[7-9]</sup>。球体开孔型泡沫铝由于内部结构孔排列均匀且大小相近,其结构相对比常规不规则泡沫铝相对稳定,这导致其在承受冲击载荷时孔壁不容易断裂,更适用于抗压缓冲,是一种较好的缓冲吸能材料<sup>[10-12]</sup>; JIGH 制备了不规则外形的泡沫试样,并对复杂形状的试验构件进行三维建模,从而分析了其力学性能<sup>[13]</sup>; Liu 等探索了泡沫铝在受载荷压缩变形时的抗压能力,并对泡沫铝-聚氨酯复合材料的压缩过程进行了分析<sup>[14-16]</sup>; Bao 等发现了泡沫铝材料在受压阶段会出现平台应力,并且探索了改变泡沫材料的相对密度对平台区的影响<sup>[17]</sup>。

以上学者对泡沫铝材料的研究使用的都是专为实验生产的试样,无法排除在制造试样过程中复杂人为因素对结果的影响,因而选用经目前已成熟的生产工艺批量化生产的球体开孔型泡沫铝进行实验分析有很大必要。文中对不同相对密度的球体开孔型泡沫铝进行对比试验,分析球体开孔型泡沫铝力学行为特性受相对密度的影响。

## 1 实验

### 1.1 材料

文中球体开孔型泡沫铝是由北京中实强业供给的3块平均孔径均为5 mm(壁孔为1.5 mm)的泡沫铝板,泡沫铝板所用铝基材料为1100纯铝,见图1。用线切割法对提供的泡沫铝板直接切割,来确保试件内部结构的完好,且可以保证切割时的精度,切割成大小为35 mm×20 mm的试样,见图2。除去分割后样品的油污,然后对其统一编号。随后通过电子天平称量出这3块试件的质量,并通过式(1)得到3个泡沫铝试件的相对密度分别为0.35(1<sup>#</sup>),0.367(2<sup>#</sup>),0.392(3<sup>#</sup>)。

$$\rho_r = \frac{\rho_{AF}}{\rho_s} \tag{1}$$

式中: $\rho_r$ 为相对密度; $\rho_{AF}$ 为密度; $\rho_s$ 为基体铝密度,文中所用基体铝的密度为2.7 g/cm<sup>3</sup>。

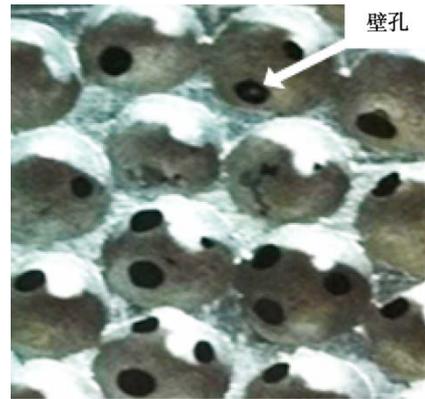


图1 球体开孔泡沫铝板材

Fig.1 Spherical open cell aluminum foam sheet



图2 泡沫铝试样

Fig.2 Aluminum foam sample

### 1.2 仪器

实验中采用LS-W 50000A型微机控制弹簧试验机,实验设置加载速率为5 mm/min,该试验机可加载的最大载荷为50 kN。

### 1.3 准静态压缩试验

将实验中的加载速率设置为5 mm/min,然后进行压缩实验,见图3。通过压缩实验的数据绘制出对应的载荷-位移曲线,进一步计算得到对应的名义应力-应变曲线。然后利用Origin进行作图。



图3 泡沫铝准静态压缩实验

Fig.3 Quasi-static compression experiment of aluminum foam

通过对 3 个试样分别进行准静态压缩,并利用所得数据分别绘制出应力-应变曲线,通过对曲线进行

分析,研究泡沫铝材料相对密度影响压缩吸能性能的相关规律。材料经过准静态压缩实验后的状态见图 4。

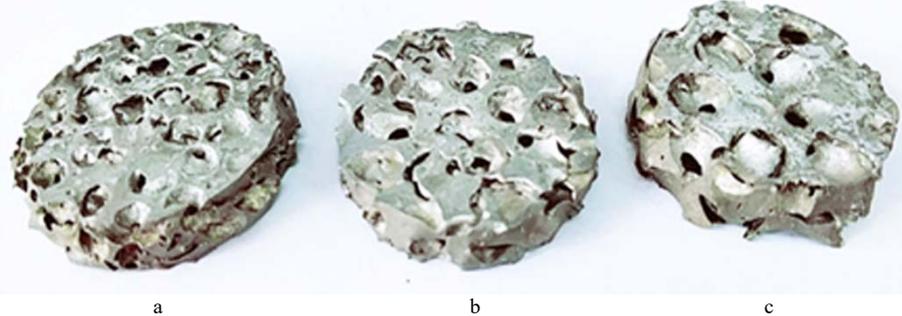


图 4 压缩后泡沫铝试件  
Fig.4 Compressed aluminum foam specimens

## 2 结果分析

### 2.1 泡沫铝相对密度对纯泡沫铝压缩性能的影响

泡沫铝材料的压缩性能与响度密度和开孔直径都有关系,因此为了确定研究变量,需要对所有试样泡沫铝材料块的开孔直径进行统一,保证 3 个试样仅在相对密度参数上存在差异。文中选择了 1#, 2#, 3# 等 3 个试样,其孔径都为 5 mm,对其进行准静态压缩实验后,可以得出应变-应力曲线,见图 5。

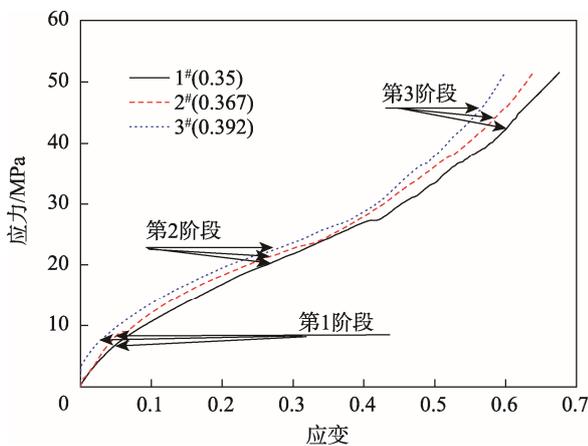


图 5 不同试样应变-应力曲线  
Fig.5 Strain-stress curves of different specimens

由图 5 知,3 个泡沫铝试样对应的应变-应力曲线均符合多孔材料的 3 个阶段:线性弹性阶段、塑性强化阶段、致密压实阶段。其与常规不规则泡沫铝静态压缩有一定的区别,常规不规则泡沫铝受压时分为:弹性阶段、平台应力阶段、密实阶段,主要区别在于第 2 阶段。与常规不规则泡沫铝相比,球体开孔泡沫铝的应力-应变曲线没有明显的塑性平台阶段,是塑性强化阶段。此外,从图 5 还可以

明显看出,在应变逐步变大的同时,对应的应力也在逐渐变大,较密实阶段增加速率相对较慢;由于球体开孔型泡沫铝其内部结构相对稳定、孔孔排列相对均匀、形状较为规则、且随着变形孔壁变得更厚,因而能承受的载荷变大。将摩擦、试件底部不完全接触等因素的影响排除后,由应力-应变曲线可知:1#试样的屈服强度为 3.36 MPa,2#试样的屈服强度为 3.63 MPa,3#试样的屈服强度为 6.56 MPa,即相对密度从 0.35 提高到 0.392 时,屈服强度提高了 95.2%。分析图 5 得知,当泡沫铝相对密度提高后,同等应变下泡沫铝所能承受的载荷也变大,其压缩性能也变好。造成该种现象的主要原因:在泡沫铝相对密度变大的同时,泡沫铝内部孔洞总体积减小,由于泡沫铝材料总体积一定,因此泡沫铝内部孔壁相对增加,在受载荷压缩变形时其可以经受的载荷也跟着变大,从而导致其压缩性能有所提升。

### 2.2 泡沫铝相对密度对纯泡沫铝吸能性能的影响

对泡沫铝做准静态压缩试验时,随着压缩量的逐步变大,试件内部结构产生变形,作为骨架的结构在变形时会吸收能量,在其应力-应变曲线上表现为塑性变形阶段较长,也就表明该材料有着优良的吸能性。通过单位体积的总形变功来表示单位体积球体开孔泡沫铝所吸收的能量,表达式见式(2)。

$$C = \int_0^{\epsilon_m} \sigma_m d\epsilon \quad (2)$$

式中: $C$  为准静态压缩过程中吸收的能量,代表压缩得到的应力-应变曲线下方面在一定应变范围内对应的面积,可以通过曲线积分计算获得; $\epsilon_m$  为压缩时的任意工程应变; $\sigma_m$  为泡沫铝在压缩应变为  $\epsilon_m$  时对应的应力。

3 个试件的应变-吸能曲线见图 6。从图 6 可以明显看出,当 3 个试件应变变量相同时,相对密度越大的试件,在受压发生变形时,所吸取的能量越多,其吸

能性能越好。此外，如图 5 的应力-应变曲线末端所示，在压缩试验机达到最大载荷时，泡沫铝相对密度越大，其变形量越小，这也从侧面印证了泡沫铝相对密度越大，其吸能性能越好。造成该种现象的主要原因在于，随着试件的相对密度增加，试件内部存在的孔洞总体积减小，由于泡沫铝材料总体积一定，泡沫铝内部孔壁相对增加，因此，在试件受到压缩变形时，其能承受较多的载荷。

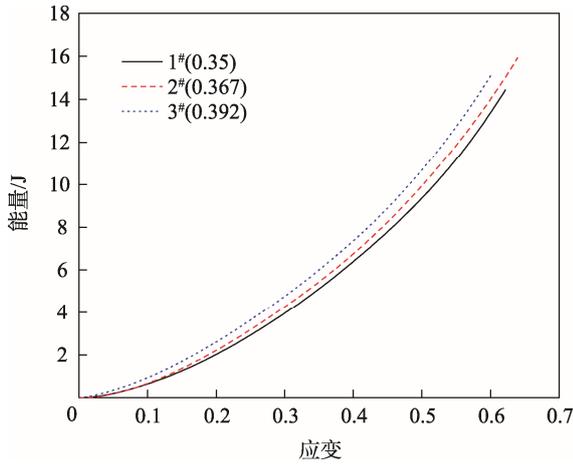


图 6 不同试样吸能曲线

Fig.6 Energy absorption curve of different specimens

### 2.3 相对密度对泡沫铝吸能效率的影响

为了对 3 个球体开孔泡沫铝试件的吸能特性有进一步认识，引入吸能效率。吸能效率为试件在压缩时所吸收的能量和该状态下受到应力的比值，计算见式 (3)，且这 3 个试件最优吸能情况也可以通过这种方法来评估。

$$E = \frac{1}{\sigma_m} \int_0^{\epsilon_m} \sigma d\epsilon \quad (3)$$

式中： $\epsilon_m$  为工程应变； $\sigma_m$  为与  $\epsilon_m$  对应的应力。得到了 3 个球体开孔泡沫铝试件的吸能效率曲线，见图 7。

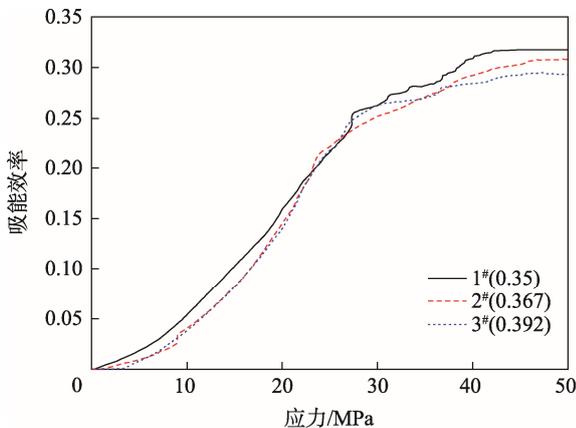


图 7 不同试样吸能效率曲线

Fig.7 Energy absorption efficiency curves of different specimens

由图 7 可知，3 个球体开孔泡沫铝试件在所受应力约为 40 MPa 前，随着应力的变大，吸能效率逐步提高，随后开始趋于稳定，且均在应力值约为 49 MPa 时，吸能效率达到峰值。3 个试样中，相对密度为 0.392 的试件其吸能效率能达到的稳定值近似为 0.294；相对密度为 0.35 的试件其吸能效率能达到的稳定值近似为 0.318；相对密度在两者之间为 0.367 的泡沫铝试件最大吸能效率近似为 0.308，即相对密度从 0.35 增加到了 0.392 时，3 个试件对应吸能效率的稳定值却降了近 2.4%，可以得出这 3 个试件能达到的最优吸能效率受试件相对密度的影响很大。纯泡沫铝试件的相对密度与吸能效率的最大值呈负相关关系，主要是因为泡沫铝相对密度增加时，对应的孔隙率变小，泡沫铝内部孔壁相对增大，因此受到压缩发生形变时，其所能承受的载荷增大，吸能越好，导致吸能效率的峰值降低。此外，由图 5 可知，当 3 个试件的应力都为 49 MPa 时，各试件的应变均在 0.6 附近，可见当孔径均为 5 mm 的球体开孔泡沫铝的应变约在 60% 时，其处于最佳吸能状态。试件在最大吸能效率处时，吸能性能得到充分的发挥，吸能性能最好，因而最大吸能效率可有效确定球体开孔泡沫铝吸能的最佳状态。

为了评价该泡沫铝在吸能性方面和理想吸能材料存在的差距，同时探究相对密度对其理想吸能效率的作用机理，更加深入地分析了 3 个试件的理想吸能效率。通常用泡沫材料在压缩阶段实际吸取能量与理想状态下吸取能量之比表示理想吸能效率，来评价泡沫铝的吸能性，计算见式 (4)。

$$I = \frac{1}{\epsilon_m \sigma_m} \int_0^{\epsilon_m} \sigma d\sigma \quad (4)$$

随着应力的逐步增加，3 个试件的理想吸能效率变动情况见图 8。由图 8 可知，当泡沫铝所受应力增加时，其理想吸能效率的变化呈现先增大后减小的趋势，且 3 个不同相对密度试件的最大理想吸能效率在应力近似为 20~24 MPa 时达到最大，随后理想吸能效率曲线缓缓降低，其中 3 个试件理想吸能效率的最大值均接近 0.64。相对密度最小的试件，其最大理想吸能效率最高，相对密度为 0.35，0.367 和 0.392 的试件对应的最大理想吸能效率分别为 0.65，0.64 和 0.62。可见，在此次研究的泡沫铝相对密度范围内，泡沫铝相对密度越大，其在压缩过程中展现出来的理想吸能效率峰值越小；相对密度越小，其压缩过程中表现出的理想吸能效率峰值越大。造成这种现象的主要原因在于，当泡沫铝的相对密度提高时，其孔隙率下降，泡沫铝内部孔壁相对增大，因此在受到压缩发生形变时，其所能承受的载荷增大，吸能越好，进而导致理想吸能效率的峰值降低。

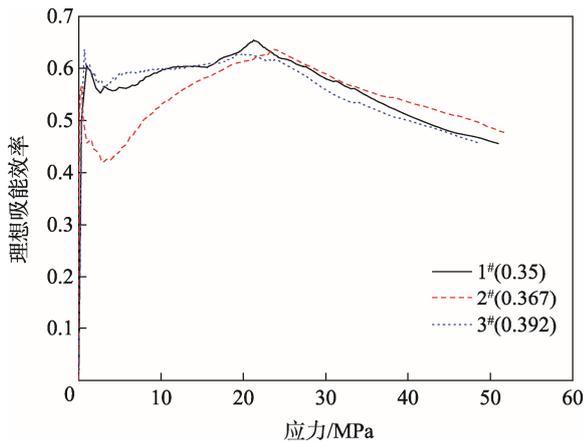


图8 不同试样理想吸能效率曲线

Fig.8 Ideal energy absorption efficiency curves of different specimens

### 3 结语

对相对密度分别为 0.35, 0.367, 0.392 的 3 个球体开孔型泡沫铝试件做准静态压缩试验, 对比分析了相对密度对球体开孔型泡沫铝物理性质的作用规律, 并推导出了不同相对密度球体开孔型泡沫铝的吸能效率曲线, 探究了最大理想吸能效率与泡沫铝相对密度的关系, 得出以下 3 点结论。

1) 泡沫铝压缩应力-应变曲线呈线性弹性、塑性强化、致密压实 3 个阶段。在相对密度逐步变大的同时, 其屈服强度也同步变大; 同时, 当相对密度较大时, 泡沫铝压缩性能与吸能性能更好, 呈正相关关系。

2) 可以通过最大吸能效率有效地确定泡沫铝的最佳的吸能状态, 实际材料与理想材料之间的差距可由理想吸能效率体现出来。纯泡沫铝相对密度越大, 吸能效率最大值越小, 理想吸能效率的最大值也越小, 这对工程中泡沫铝作为吸能材料时的选取和充分利用其物理性能有很大的指导意义。

3) 球体开孔泡沫铝优良的压缩及吸能性能可用于汽车保险杠、精密仪器的包装, 起防撞、吸能的作用, 也可用于运输行业中货车的地板、侧衬等, 达到高强度防撞缓冲的目的。

#### 参考文献:

[1] 张伟, 齐明思, 赵志芳, 等. 泡沫铝-聚氨酯复合材料压缩性能分析[J]. 包装工程, 2018, 39(17): 6—11.  
ZHANG Wei, QI Ming-si, ZHAO Zhi-fang, et al. Compression Properties of Aluminum Foam-polyurethane Composites[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(17): 6—11.

[2] 张伟, 齐明思, 赵志芳. 泡沫铝-聚氨酯复合材料制备及力学性能分析[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 35—40.

ZHANG Wei, QI Ming-si, ZHAO Zhi-fang. Preparation and Mechanical Properties of Foamed Aluminum-polyurethane Composites[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 35—40.

[3] 孙亮, 齐明思, 王俊元, 等. 基于冲击试验的泡沫铝-聚氨酯缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2015, 36(15): 73—76.  
SUN Liang, QI Ming-si, WANG Jun-yuan, et al. Study on Cushioning Properties of Foamed Aluminum-polyurethane Based on Impact Experiment[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(15): 73—76.

[4] 轩鹏. 高性能泡沫铝减振机理及力学性能试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
XUAN Peng. Study on Damping Mechanism and Mechanical Properties of High Performance Aluminum Foam[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

[5] 谢卫红, 杜红涛, 李顺才. 聚氨酯泡沫铝复合材料动态力学试验[J]. 复合材料学报, 2011, 28(3): 103—108.  
XIE Wei-hong, DU Hong-tao, LI Shun-cai. Dynamic Mechanical Experiment of Polyurethane Foam Aluminum Composite[J]. Journal of Composites, 2011, 28(3): 103—108.

[6] 杨江涛, 马喜宏, 邬琦. 聚氨酯与泡沫铝的冲击响应分析及可靠性研究[J]. 热加工工艺, 2015(8): 74—78.  
YANG Jiang-tao, MA Xi-hong, WU Qi. Study on Impact Response and Reliability of Polyurethane and Aluminum Foam[J]. Hot Working Technology, 2015(8): 74—78.

[7] 曾繁波, 兰凤崇, 陈吉清, 等. 泡沫铝结构的吸能特性影响参数试验分析[J]. 机械设计与制造, 2014(9): 14—18.  
ZENG Fan-bo, LAN Feng-chong, CHEN Ji-qing, et al. Effects of Energy Absorption Characteristics of Aluminum Foam Structures on Parameter Test Analysis[J]. Machine Design and Manufacturing, 2014(9): 14—18.

[8] 曾斐, 潘艺, 胡时胜. 泡沫铝缓冲吸能评估及其特性[J]. 爆炸与冲击, 2002(4): 358—362.  
ZENG Fei, PAN Yi, HU Shi-sheng. Evaluation and Characteristics of Buffer Aluminum Absorb Energy[J]. Explosion and Shock Waves, 2002(4): 358—362.

[9] JINNAPAT A, KENNEDY A. Characterisation and Mechanical Testing of Open Cell Al Foams Manufactured by Molten Metal Infiltration of Porous Salt Bead Preforms: Effect of Bead Size[J]. Metals, 2012, 2(2): 122—135.

[10] KISHIMOTO S, WANG Q, TANAKA Y, et al. Compressive Mechanical Properties of Closed-cell Aluminum Foam-polymer Composites[J]. Composites Part B, 2014, 64: 43—49.

[11] MOZAFARI H, MOLATEFI H, CRUPI V, et al. In Plane Compressive Response and Crushing of Foam Filled Aluminum Honeycombs[J]. Journal of Composite Materials, 2015, 49(26): 3215—3228.

- [12] KADKHODAPOUR J, RAEISI S. Micro-macro Investigation of Deformation and Failure in Closed-cell Aluminum Foams[J]. *Computational Materials Science*, 2014, 83(2): 137—148.
- [13] JIGH B H G, TOUDESHPY H H, FARSI M A. Experimental and Multi-scale Analyses of Open-celled Aluminum Foam with Hole under Compressive Quasi-static Loading[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2017, 695: 133—141.
- [14] LAMANNA E, GUPTA N, CAPPAL P, et al. Evaluation of the Dynamic Properties of an Aluminum Syntactic Foam Core Sandwich[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 2987—2994.
- [15] LIU S, LI A, HE S, et al. Cyclic Compression Behavior and Energy Dissipation of Aluminum Foam-polyurethane Interpenetrating Phase Composites[J]. *Composites Part A*, 2015, 78: 35—41.
- [16] BAI Z, GUO H, JIANG B, et al. A Study on the Mean Crushing Strength of Hexagonal Multi-cell Thin-walled Structures[J]. *Thin-walled Structures*, 2014, 80(9): 38—45.
- [17] BAO H, LI A. Study on Quasi-static Uniaxial Compression Properties and Constitutive Equation of Spherical Cell Porous Aluminum-polyurethane Composites[J]. *Materials*, 2018, 11(7): 12—61.