缓冲与隔振

泡沫铝相对密度对泡沫铝-聚氨酯复合材料吸能性能的影响

张新玉[1]，张伟[2]，尹一平[2]，任光明[2]
（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 通过准静态压缩试验研究泡沫铝-聚氨酯复合材料（AF-PU）的压缩性能，并利用试验数据探究泡沫铝（AF）相对密度对整体材料吸能性能的影响规律。**方法** 首先使用相关仪器和材料制备 AF-PU 复合材料，其次用相关仪器对其进行准静态压缩试验。**结果** AF-PU 复合材料通过相关仪器进行准静态压缩试验，计算得到相对应的应力-应变曲线，同时通过计算得到相对应的吸能-应变曲线。当泡沫铝相对密度从 5.6%增加到 6.7%时，整体复合材料的屈服强度提升了 22.18%。在压缩过程中，当复合材料的压缩应变为 0.8 时，整体复合材料的总吸能增加了 70.08%。**结论** AF-PU 复合材料的吸能性能随着 AF 相对密度的增加而增强。

关键词：泡沫铝-聚氨酯；相对密度；复合材料；吸能性能
中图分类号：TB485.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2019)21-0094-05
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.21.014

Influence of Relative Density of Aluminum Foam on Energy Absorption Properties of Aluminum Foam-polyurethane Composites

ZHANG Xin-yu[1], *ZHANG Wei*[2], *YIN Yi-ping*[2], *REN Guang-ming*[2]
(1.North University of China, Taiyuan 030051, China; 2.Taiyuan Thermal Power Group Co., Ltd., Taiyuan 030001, China)

ABSTRACT: The work aims to study the compressive properties of aluminum foam-polyurethane (AF-PU) composites through the quasi-static compression experiments, and investigate the rule of effect of relative density of aluminum foams (AF) on the energy absorption properties of the composites. AF-PU composites were first prepared with related instruments and materials, and then the quasi-static compression experiments were carried out with related instruments. The AF-PU composite material was subject to the quasi-static compression experiments by related instruments, the corresponding stress-strain curves were calculated, and the corresponding energy absorption-strain curves were obtained by calculation. When the relative density of aluminum foam increased from 5.6% to 6.7%, the yield strength of the overall composite increased by 22.18%. During the compression process, when the compressive strain of the composite was 0.8, the total energy absorption of the overall composite increased by 70.08%. The energy absorption properties of AF-PU composites intensify with the increase of the relative density of AF.

KEY WORDS: aluminum foam-polyurethane; relative density; composite; energy absorption properties

泡沫铝作为一种内部结构复杂的结构型金属泡沫材料，其内部孔洞复杂无规则且可复现性差，这导致其具有良好的力学性能。由于其具有良好的吸能缓冲性能，因此很多精密仪器选用泡沫铝作为缓冲隔振材料[1—6]。泡沫铝分为开孔泡沫铝和闭孔泡沫铝，开孔泡沫铝内部孢孔之间相互连通，闭孔泡沫铝各个孢

收稿日期：2019-06-21
作者简介：张新玉（1991—），男，中北大学博士生，主攻信号处理、缓冲材料及图像处理。
通信作者：张伟（1991—），男，硕士，工程师，主要研究方向为缓冲包装。

孔相对独立各自封闭。制备工艺的不同以及内部结构的差异又可以分为常规不规则泡沫铝和球型孔泡沫铝[7—9]。不同内部结构（一般指不同泡沫铝孔径、不同泡沫铝相对密度）的泡沫铝压缩性能基本不同，而且吸能性能相差很大。开孔型泡沫铝各个壁孔之间相互贯通。在受到冲击载荷时，不会由于内部孔封闭而反弹，在缓冲时更加容易吸收能量[10—13]。聚氨酯作为一种多孔聚合物，被广泛用作结构型材料的填充物[14—15]来制备复合材料。文中首先制备 AF-PU 复合材料；其次对其进行准静态单轴压缩；最后对试验数据进行分析，通过试验结果研究泡沫铝相对密度对 AF-PU 复合材料在准静态单轴压缩过程中吸能性能的影响规律。

1　试验

1.1　材料及仪器

文中选用的泡沫铝是由昆山创来王材料厂家提供的平均孔径为 5 mm 的泡沫铝板，见图 1。泡沫铝板所用铝基材料为 1100 纯铝。为保证泡沫铝内部结构完整及加工精度，运用线切割法将其切割为 ϕ35 mm×15 mm 的试样。将切割后的样品进行油污处理，随后放入恒温干燥箱内烘干，随后对其进行统一编号，并利用电子天平称量各试样的质量并记录，计算泡沫铝的密度，从而通过式（1）得到泡沫铝的相对密度 ρ_r。

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

式中：ρ_r 为泡沫铝相对密度；ρ_{AF} 为泡沫铝密度；ρ_s 为基体铝的密度，文中所用值为 2.7 g/cm^3。

聚氨酯采用德国拜耳 9370A 型聚氨酯，其颗粒见图 2。

1.2　仪器

仪器主要有加热油浴，河南省予华仪器有限公司；120 W 功率搅拌机（JB90-SH），上海邦西仪器科技有限公司；干燥箱；砂轮打磨机；AL-7000M 伺服拉力试验机。

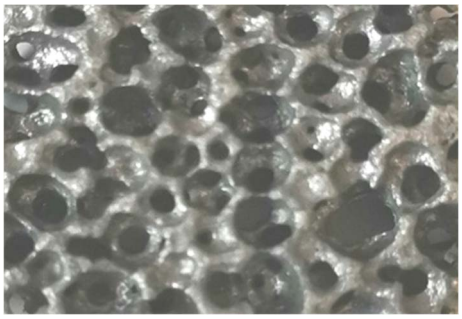

图 1　开孔泡沫铝板
Fig.1 Open-cell aluminum foam sheet

图 2　德国拜耳 9370A 型聚氨酯颗粒
Fig.2 Bayer 9370A polyurethane particles

1.3　样品制备

首先将适量的聚氨酯固体颗粒放入容量为 1 L 的三口烧瓶中，将其放置于 220 ℃的恒温油浴内进行加热，同时打开搅拌器，将转速调至 200 r/min，进行搅拌直至颗粒状的聚氨酯融化为液状为止。为使烧瓶内聚氨酯融化状态较为均匀，此时将搅拌器转速调整为 500 r/min，持续 5~10 min 后停止搅拌。随后迅速将定量液态状的聚氨酯注入由聚四氟乙烯制备的模具内，快速将泡沫铝试样放于模具中心，试压至模具内液态聚氨酯渗入到泡沫铝上表面，此时在泡沫铝上表面继续浇筑液态聚氨酯，使其覆盖整个泡沫铝试样，随后盖上模具顶盖，将装有试样的模具放于平滑的桌面上，反复挤压顶盖，使得聚氨酯可以与泡沫铝更加完美地结合。将模具置于 80 ℃的恒温干燥箱内熟化 12 h，后取出试样置于常温室内 12 h，使得聚氨酯完全固化。随后对试样进行打磨处理，将表面打磨光滑后利用电子天平进行称量记录。并对制备完成的 SOAF/PU 复合材料进行标注，制备完成的 AF-PU 复合材料试样见图 3。

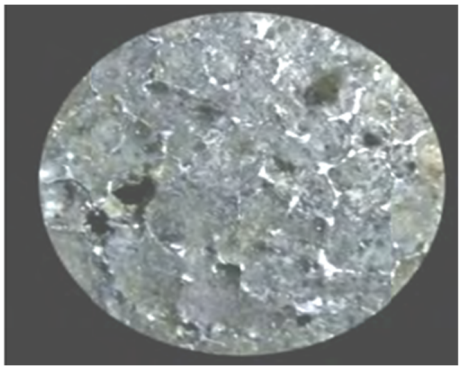

图 3　AF-PU 试样
Fig.3 AF-PU sample

1.4　准静态单轴压缩试验

文中首先对 AF-PU 复合材料进行准静态压缩试验，所采用的相关仪器为 AL-7000M 伺服控制型万能试验机。该试验机所能加载的最大载荷为 20 kN，试验设置加载速率为 2 mm/min。通过压缩试验获得对应的载

荷-位移曲线，由载荷-位移曲线通过式（2）和式（3）得到对应的名义应力-应变曲线，利用 Origin 作图。

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0} \tag{2}$$

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{3}$$

式中：σ_n 为材料名义应力；F 为承受载荷；A_0 为试样原截面积（压缩前）；ε_n 为材料名义应变；Δl 为压缩试样的厚度变化量；l_0 为试样原厚度（压缩前）。

2　结果分析

通过准静态单轴压缩试验，对相对密度不同的 3 个试样（各试件的参数见表 1）进行压缩得出的应力-应变曲线见图 4。AF-PU 复合材料准静态单轴压缩应力-应变曲线呈三段式特征：线性弹性阶段、塑性平台阶段、致密压实阶段[16]。通过试验曲线可知试样 A_1，A_2，A_3 的屈服强度分别为 1.3517，1.2555，1.2218 MPa。泡沫铝相对密度从 5.6%增加到 6.7%。AF-PU 复合材料的屈服强度提升了 22.18%。从图 4 中可以看出，在相同的变形情况下，随着泡沫铝相对密度的增加，AF-PU 复合材料在准静态单轴压缩时所能承受的载荷随之增加。造成这种现象的主要原因是泡沫铝相对密度增加，材料孔隙率减少，泡沫铝内部孔壁变厚，在准静态单轴压缩时，其所能承受的载荷随之增加。

表 1　泡沫铝相对密度不同试样对应的参数

Tab.1 Parameters corresponding to different samples of aluminum foam relative density

试样	泡沫铝质量/g	泡沫铝-聚氨酯质量/g	聚氨酯质量/g	孔径/mm	泡沫铝相对密度/%
A_1	2.61	16.74	14.13	5	6.7
A_2	2.43	16.56	14.13	5	6.2
A_3	2.24	16.37	14.13	5	5.6

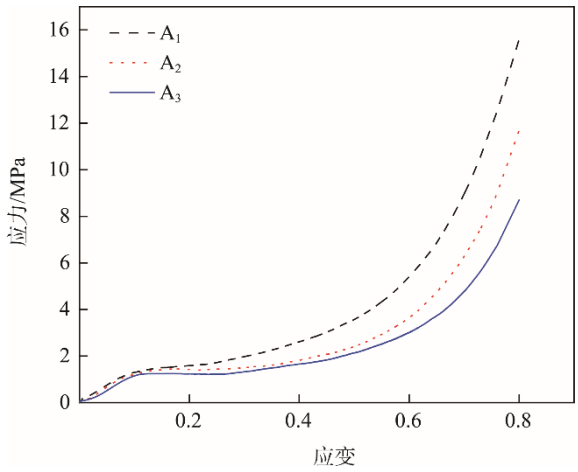

图 4　不同相对密度泡沫铝对应的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves corresponding to different relative densities of aluminum foam

3　泡沫铝相对密度对 AF-PU 吸能性能的影响

当 AF-PU 复合材料在相关仪器中进行准静态单轴压缩试验时，AF-PU 复合材料中泡沫铝充当的骨架发生形变甚至断裂，聚氨酯发生弹性变形。泡沫铝、聚氨酯两者分别通过各自的方式来抑制变形、吸收能量。AF-PU 复合材料在受到压缩载荷时发生形变，在复合材料内 2 种材料以同样的方式来阻止形变来吸收能量，在压缩形变过程中单位体积所能吸收的能量可以通过单位体积的总形变功来表示[17]，表达式见式（4）。随后利用 Origin 作图。

$$C = \int_0^{\varepsilon_m} \sigma_m \mathrm{d}\varepsilon \tag{4}$$

式中：C 代表压缩得到的应力-应变曲线下方在一定应变范围内对应的面积，通过应力-应变曲线积分计算获得；ε_m 代表压缩过程中的任意工程应变，σ_m 为 ε_m 在压缩时对应的应力。

通过各试件的应力-应变曲线计算得到对应的吸能-应变曲线，见图 5。在同等应变下，泡沫铝相对密度越大，在压缩变形时，AF-PU 复合材料吸收的能量越多，吸能性能越好。造成该种现象的主要原因在于，随着泡沫铝相对密度的增加，其孔隙率减小，泡沫铝内部孔洞总体积减小；由于泡沫铝基体材料总体积一定，随着泡沫铝相对密度的增加，泡沫铝内部孔棱柱相对较厚，且相同填充量的聚氨酯在承受压缩载荷时所能承受的载荷也随着增加，因此，吸能性能也随着增加。

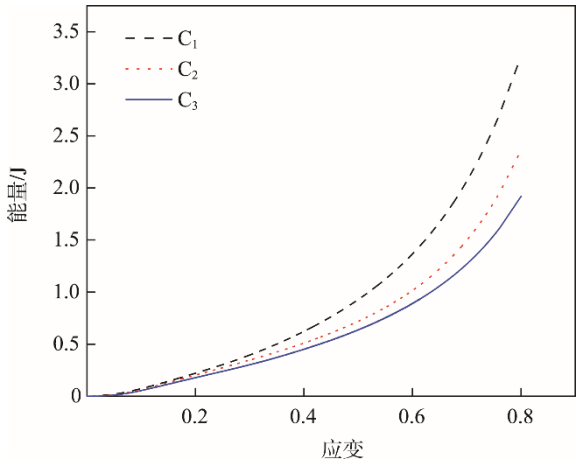

图 5　不同相对密度泡沫铝对应的吸能-应变曲线

Fig.5 Energy absorption-strain curve corresponding to different relative densities of aluminum foam

当达到极限形变时，各试件所吸收的总能量见图 6，泡沫铝相对密度从 5.6%增加到 6.7%，整体复合材料的总吸能增加了 70.08%。

在对泡沫铝吸能性能优劣的进行评估时，除了以单位体积泡沫铝所吸收的能量作为吸能性能衡量的

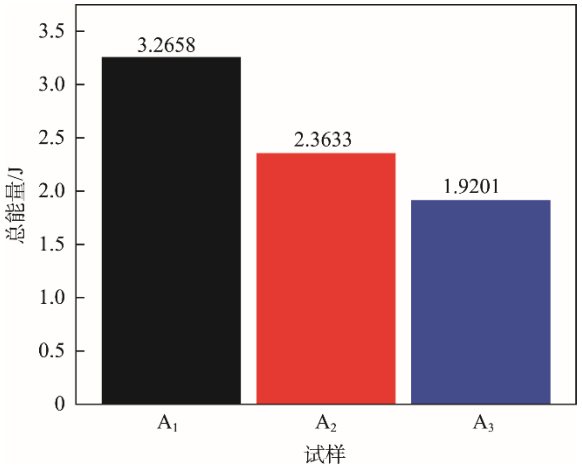

图 6　试样压缩时所吸收的总能量

Fig.6 Total energy absorbed by the sample during compression

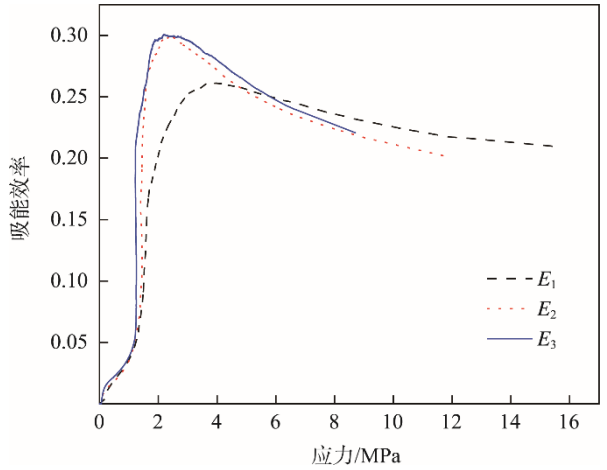

图 7　AF-PU 复合材料各试样对应的吸能效率-应力曲线

Fig.7 Energy absorption efficiency-stress curve of each sample of AF-PU composite

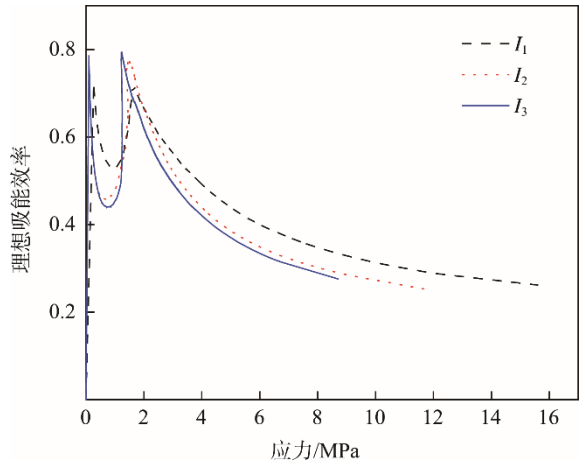

图 8　AF-PU 复合材料各试样对应的理想吸能效率-应力曲线

Fig.8 Ideal energy absorption efficiency-stress curve of each sample of AF-PU composite

标准以外，Milts 等[18]提出吸能效率曲线和理想吸能效率曲线可以作为材料吸能性能的一种评估参数。理想吸能效率 I 为实际泡沫材料与理想吸能材料压缩至相同应变时所吸收能量的比值，反映了材料的吸能本领这一材料本身的基本属性。吸能效率 E 为实际泡沫材料压缩至某应变时所吸收的能量与对应应力值的比值。

定义吸能效率 E 的公式为：

$$E=\frac{1}{\sigma_{\mathrm{m}}}\int_0^{\varepsilon_{\mathrm{m}}}\sigma\mathrm{d}\varepsilon \tag{5}$$

定义理想吸能效率 I 的公式为：

$$I=\frac{1}{\varepsilon_{\mathrm{m}}\sigma_{\mathrm{m}}}\int_0^{\varepsilon_{\mathrm{m}}}\sigma\mathrm{d}\varepsilon \tag{6}$$

式中：E 为复合材料压缩过程中对应的吸能效率；I 为复合材料试样对应的理想吸能效率；ε_{m} 代表压缩过程中的任意工程应变；σ_{m} 为 ε_{m} 在压缩时所对应的应力。

根据应力-应变曲线及公式（5）通过计算可得到不同相对密度泡沫铝对应的 AF-PU 复合材料吸能效率曲线，见图 7。

试样 A_1 对应的最大吸能效率为 26.01%，此时对应的应力为 3.7701 MPa；试样 A_2 对应的最大吸能效率为 29.73%，此时对应的应力为 2.2409 MPa；A_3 对应的最大吸能效率为 30%，此时对应的应力为 2.2107 MPa。由图 7 可知，随着泡沫铝相对密度的逐渐增加，AF-PU 复合材料的最大吸能效率随之降低。

根据应力-应变曲线及式（6）通过计算可得到不同相对密度泡沫铝对应的 AF-PU 复合材料理想吸能效率曲线，见图 8。

I_1 为试样 A_1 对应的理想吸能效率，I_2 为试样 A_2 对应的理想吸能效率，I_3 为试样 A_3 对应的理想吸能效率。AF-PU 复合材料的理想吸能效率随应力的增加呈现先增大后减小又大增加再减小的趋势。在应力很小时，材料的理想吸能效率快速增加；当达到一定值时，随着应力的增加，试样的理想吸能效率随之减小；当达到一个波谷时，随着应力的增加，试样的理想吸能效率随之增加；再次达到一个峰值时（该峰值即为各试样需要的理想吸能效率值），随着应力的增加，试样的理想吸能效率随之减小。由图 8 可知，试样 A_1 对应的理想吸能效率为 71.25%，此时对应的应力为 1.6783 MPa；试样 A_2 对应的理想吸能效率为 77.77%，此时对应的应力为 1.4612 MPa；A_3 对应的最大吸能效率为 79.35%，此时对应的应力为 1.2209 MPa。

材料最大吸能效率与理想吸能效率的差值是表征材料吸能性能的一个重要参数，两者相差越小，代表该材料吸能性能越好；两者相差越大，材料吸能性能越差。试样 A_1 的最大吸能效率与理想吸能效率相差 45.24%，试样 A_2 的最大吸能效率与理想吸能效率相差 48.04%，试样 A_3 的最大吸能效率与理想吸能效率相差 49.35%，因此可知试样 A_1 的吸能性能最好，其次为 A_2，最后为 A_3，与上述分析相一致。同时也

验证了 AF-PU 复合材料的吸能性能随着相对密度的增加而增强。

4 结语

文中首先制备了 AF-PU 复合材料，随后通过相关仪器对 3 种泡沫铝进行准静态单轴压缩试验，对不同相对密度 AF-PU 复合材料的吸能性能进行了分析与研究，得到以下结论。

1）随着泡沫铝相对密度的逐渐增大，AF-PU 复合材料的吸能性能也逐渐增加，呈正相关关系。

2）AF-PU 复合材料在准静态压缩过程中的吸能性能可利用吸能效率和理想吸能效率进行评估，吸能效率可以有效确定 AF-PU 复合材料的最佳吸能状态。同时，从测面验证了 AF-PU 复合材料在进行准静态单轴压缩时，AF-PU 复合材料的吸能性能随着泡沫铝相对密度的增加而增强。

参考文献：

[1] 于丽丽, 李爱群, 解琳琳, 等. 泡沫铝压缩和吸能性能的影响因素分析[J]. 建筑技术, 2018, 49(3): 315—318.
YU Li-li, LI Ai-qun, XIE Lin-lin, et al. Analysis of Influencing Factors of Foam Aluminum Compression and Energy Absorption[J]. Architectural Technology, 2018, 49(3): 315—318.

[2] 朱梦蛟, 周素洪, 王渠东, 等. 泡沫铝材料的制备技术及应用现状[J]. 热加工工艺, 2017, 46(12): 21—25.
ZHU Meng-jiao, ZHOU Su-hong, WANG Qu-dong, et al. Preparation Technology and Application Status of Aluminum Foam[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(12): 21—25.

[3] 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 Performance Analysis of Foamed Aluminum-polyurethane Composites[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(17): 6—11.

[4] 孙亮, 齐明思, 王俊元, 等. 基于冲击实验的泡沫铝-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 Foam Aluminum-polyurethane Buffer Performance Based on Impact Test[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(15): 73—76.

[5] 王刚, 杨红新, 焦孟旺, 等. 泡沫铝在汽车上的开发应用[J]. 稀有金属, 2015, 39(7): 660—665.
WANG Gang, YANG Hong-xin, JIAO Meng-wang, et al. Development and Application of Foamed Aluminum in Automobile[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2015, 39(7): 660—665.

[6] 鲁林, 李晓峰. 冲击环境作用下聚氨酯材料的应变率分布及吸能特性研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(S1): 213—219.
LU Lin, LI Xiao-feng. Study on Strain Rate Distribution and Energy Absorption Characteristics of Polyurethane Materials under Impact Environment[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(S1): 213—219.

[7] 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.

[8] 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.

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

[10] BAO H Y, LI A Q. Study on Quasi-static Uniaxial Compression Properties and Constitutive Equation of Spherical Cell Porous Aluminum-polyurethane Composites[J]. Materials, 2018, 11(7): 1261.

[11] ZHANG C J, FENG Y, ZHANG X B. Mechanical Properties and Energy Absorption Properties of Aluminum Foam-filled Square Tubes[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(8): 1380—1386.

[12] ZHENG Z J, WANG C F, YU J L. Dynamic Stress-strain States for Metal Foams Using a 3D Cellular Model[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2014, 72: 93—114.

[13] LIANG X L, LUO H J, MU Y L, et al. Experimental Study on Stress Attenuation in Aluminum Foam Core Sandwich Panels in High-velocity Impact[J]. Materials Letters, 2017, 203: 100—102.

[14] LIU S B, LI A Q, HE S Y, et al. Cyclic Compression Behavior and Energy Dissipation of Aluminum Foam-polyurethane Interpenetrating Phase Composites[J]. Composites Part A, 2015, 78: 35—41.

[15] CHENG S L, ZHAO X Y, XIN Y J, et al. Quasi-static Localized Indentation Tests on Integrated Sandwich Panel of Aluminum Foam and Epoxy Resin[J]. Composite Structures, 2015, 129: 157—164.

[16] YAN C, SONG X D, ZHU H, et al. Flexural Response of Carbon Fiber Reinforced Aluminum Foam Sandwich[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 52(14): 1887—1897.

[17] YAN C, SONG X D, JING C H, et al. Effects of Epoxy Resin Liquidity on the Mechanical Properties of Aluminum Foam Sandwich[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2018, 32(6): 673—691.

[18] MILTZ J, GRUENBANM G. Evaluation of Cushion Properties of Plastic Foams Compressive Measurements[J]. Polymer Engineering Science, 1981, 21(15): 1010—1014.