

A Study on Dynamic Compressive Mechanical Behaviors of Aluminum Honeycombs

Shuang Tang^{1,2}, Yunlai Deng^{1,2}, Keda Jiang², Chenqi Lei², Zhao Yang²

¹School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha

²Key Laboratory of Nonferrous Materials Science and Engineering, Ministry of Education, Central South University, Changsha

Email: tangshuang1998@163.com, luckdeng@mail.csu.edu.cn

Received: Mar. 6th, 2014; revised: Apr. 2nd, 2014; accepted: Apr. 11th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) method was employed to determine the compressive dynamic mechanical properties of three kinds of honeycombs, which were made of Al alloy 5052H18 with side lengths (b) of 1.0 - 1.83 mm, foil thicknesses (t) of 0.04 - 0.06 mm and relative densities (ρ) of 0.05 - 0.06. Results indicated that: at high strain rate, the dynamic stress-strain curves of the Al honeycombs show a general "three-stage" characteristic of porous materials. The densification strains are greater than 65%. The specific range of energy absorption is 3.32 - 5.03 MJ/m³, and the range of the maximum values of energy absorption efficiency is 0.65 - 0.7. Even though only the yield stress of the Al honeycomb with the shortest side length (1 mm) is greater than itself plateau stress, all the tested Al honeycombs have the character of strain rate sensitivity. The specific energy absorption and the energy absorption efficiency have no significant difference between the two Al honeycombs with the same ratio of side lengths/foil thickness (1.0 mm/0.04 mm, 1.5 mm/0.06 mm).

Keywords

Aluminum Honeycomb, Dynamic Mechanical Properties, Energy Absorption, SHPB

铝蜂窝材料动态压缩力学性能及吸能分析

唐爽^{1,2}, 邓运来^{1,2}, 姜科达², 雷郴祁², 杨昭²

¹中南大学材料科学与工程学院, 长沙

²中南大学有色金属材料科学与工程教育部重点实验室, 长沙

Email: tangshuang1998@163.com, luckdeng@mail.csu.edu.cn

收稿日期: 2014年3月6日; 修回日期: 2014年4月2日; 录用日期: 2014年4月11日

摘要

采用分离式霍普金森压杆(SHPB)技术, 研究了边长为1.0~1.83 mm, 箔厚度为0.04~0.06 mm, 相对密度为0.05~0.06的三种5052 H18铝合金蜂窝的动态压缩行为。结果表明: 铝合金蜂窝在高应变率条件下动态压缩与其准静态压缩的应力-应变曲线均具有明显的多孔材料三阶段特征, 其塑性屈服平台的应变率大于65%, 单位体积吸能为3.32~5.03 MJ/m³, 最大吸能效率为0.65~0.7。虽然只有边长为最小的(1 mm)铝蜂窝的失稳屈服极限应力明显高于稳态屈服平台应力, 但三种铝蜂窝的稳态屈服平台应力均具有明显的应变率敏感特性, 边长/箔厚相同的两种铝蜂窝(1.0 mm/0.04 mm, 1.5 mm/0.06 mm)的体积吸能与吸能效率差别不大。

关键词

铝蜂窝, 动态力学特性, 吸能特性, 霍普金森压杆

1. 引言

在航天航空及武器防护等需求下, 新型多孔材料的缓冲吸能特性的研究获得了广泛的关注[1][2]。铝蜂窝作为一种类似于自然界蜂窝形状的多孔材料, 具有质量轻, 比强度和比刚度高、消音和隔振性能好等特性。特别是铝蜂窝法向压缩过程中特殊的变形模式, 通过蜂窝壁的塑性变形吸收大量的能量, 缓和冲击力, 其已大量应用于包装、重要设备的防护及结构体内部填充以及军事工程中[3]。目前, 已有对于铝蜂窝的静态及低速冲击下缓冲吸能作用研究[4]-[6], 而在高速冲击载荷下, 铝蜂窝动态力学性能及缓冲吸能特性的研究较少。本文采用大截面铝合金霍普金森压杆进行试验, 对不同规格铝蜂窝施加冲击荷载, 研究其动态力学特性与吸能缓冲性能, 为其在缓冲和防护领域中的使用提供理论参考。

2. 实验材料和实验方法

实验用铝蜂窝, 材质为铝合金 5052H18, 铝蜂窝试样的名义直径 40 mm, 不同蜂窝试样动态试验前、后的实物照片如图 1 所示。各试样的特征参数列于表 1。从表 1 可以看出, 蜂窝试样 A、C 的铝箔厚度相同, 但试样 A 的边长大于 C, 其相对密度较小, 为 5%, 试样 C 的密度为 6.1%; 尽管试样 B、C 的铝箔厚度、孔边长均不同, 但其相对密度十分接近, 仅相差 0.1%。

本文动态压缩实验采用霍普金森压杆装置进行实验。同时为了更深入地认识铝蜂窝试样的动态压缩特性, 在进行动态压缩实验同时, 对与动态压缩试样相同特征参数的试样, 进行了准静态压缩试验。准静态压缩实验在 MTS 801 型材料实验机上进行, 通过控制压头的位移速度来控制试样的应变率, 试样的应变率约为 10^{-3} s^{-1} 。为了便于标记, 此后在铝蜂窝试样 A、B、C 的动态压缩试验结果及分析中分别标记为 D-A, D-B, D-C; 准静态压缩试验结果及分析中分别标记为 S-A, S-B, S-C。

霍普金森压杆装置的实验原理是基于一维弹性应力波理论, 通过应变片记录试件两侧杆上的的应力波来求得试件在高应变率下其应力随应变的变化, 从而得到试件在高速变形下应力-应变关系曲线。本

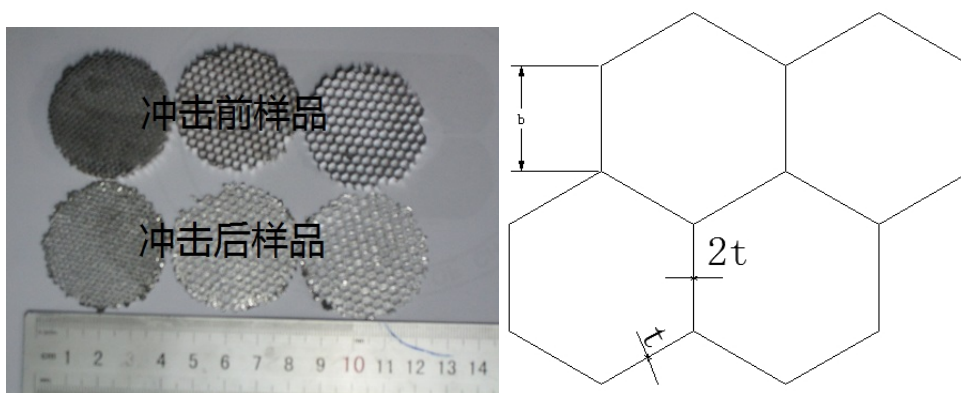


Figure 1. Three specifications of aluminum honeycomb samples
图 1. 3 种规格铝蜂窝样品

Table 1. Details of the samples
表 1. 试样明细

样品编号	铝箔厚 t (mm)	蜂窝边长 b (mm)	相对密度	样品直径(mm)	样品厚度(mm)
A	0.06	1.83	5.0%	40	5
B	0.04	1.0	6.0%	40	5
C	0.06	1.5	6.1%	40	5

实验中，采用的霍普金森压杆试验装置，主要由子弹、入射杆、透射杆以及吸收杆组成。为避免铝蜂窝尺寸效应的影 响，实验采用了直径为 40 mm 的铝合金霍普金森压杆测试系统，子弹的长度为 600 mm，入射杆和透射杆的长度均为 2000 mm，吸收杆长度为 1000 mm。由于铝蜂窝为低阻抗材料，为有效测量入射杆和透射杆上应力波信号，实验采用了在入射杆贴灵敏度系数低的普通电阻应变片，透射杆上贴灵敏度系数较高的半导体应变片。本试验中对入射应力波形采用了脉冲整形技术[7]-[9]，经过多次试验，选用直径 10 mm，厚度 0.5 mm 的黄铜片作为脉冲整形材料。

根据一维应力波理论，可得到时间的应力、应变和应变率分别为：

$$\begin{cases} \sigma_t = \frac{1}{2} \frac{A}{A_0} E [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \\ \dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_0}{L_0} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \\ \dot{\varepsilon}(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}(t) dt \end{cases} \quad (1)$$

式中应力应变均以压为正， ε_i 、 ε_r 及 ε_t 分别为压杆中的入射、反射及透射应变波， E 、 C_0 和 A 分别为压杆的弹性模量、弹性波速和横截面积， A_0 和 L_0 分别为试样的横截面积和初始长度。通过 SHPB 测得入射波、反射波及透射波，经过公式 1 得到如图 2 不同规格的铝蜂窝，动态应变下的应力 - 应变曲线，动态应变率约为 10^3 s^{-1} 。

3. 实验结果

3.1 应力应变曲线分析

如图 2 所示，铝蜂窝试样 As、B、C 的动态和静态压缩应力 - 应变曲线都呈现出多孔材料典型变形三

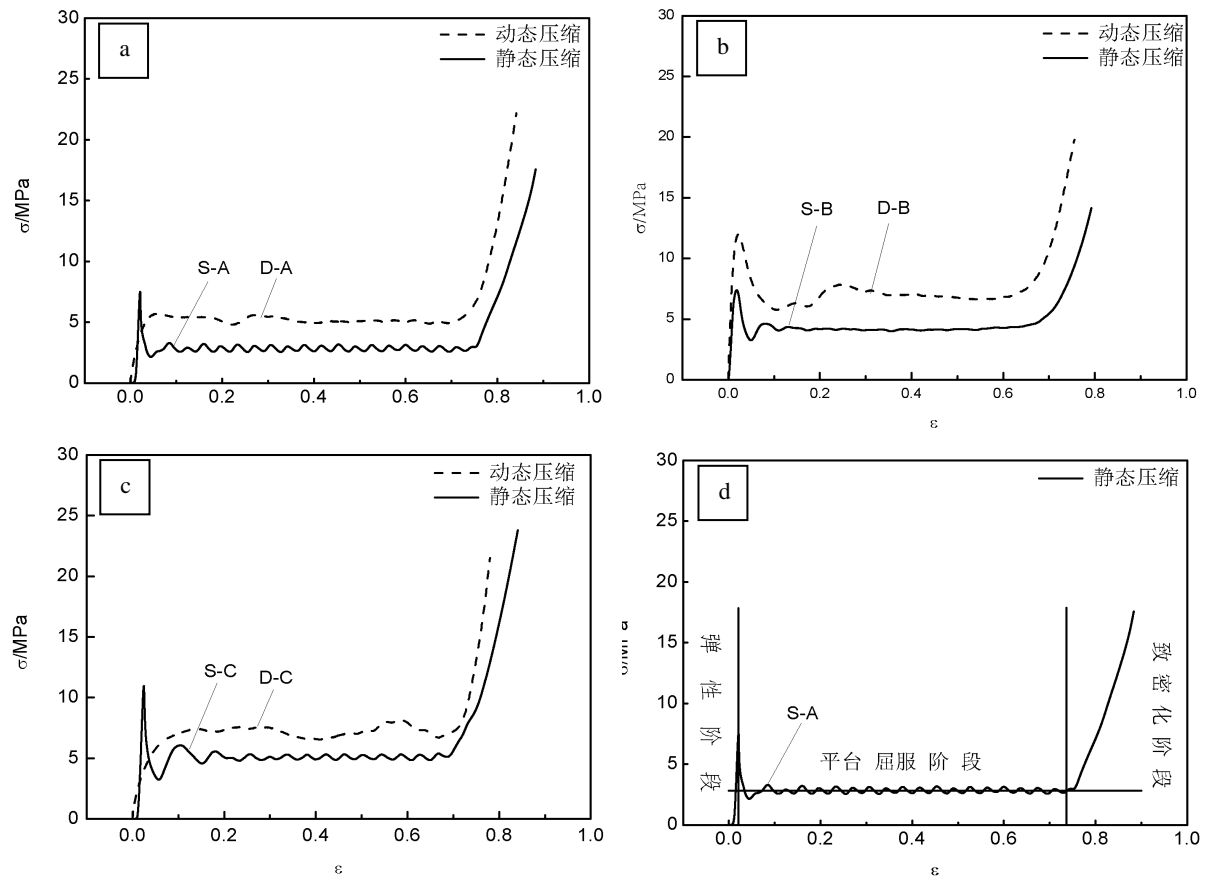


Figure 2. The quasi-static and dynamic stress-strain curves
图 2. 准静态与动态应力 - 应变曲线

阶段特性：弹性变形阶段，稳定屈服阶段，致密化阶段，动态压缩应力 - 应变曲线与静态应力 - 应变曲线规律相同，由于铝蜂窝在动态压缩变形过程中，整体结构的宏观变形过程与静态压缩变形过程相同，都为：弹性变形阶段，铝蜂窝孔格壁发生弹性变形；随着应力增加到铝蜂窝孔格壁屈服应力时，蜂窝孔格壁部分发生失稳，折叠，并不断重复这个过程；当整个压缩方向铝蜂窝孔格壁折叠完成，此时进入致密化阶段，折叠屈曲蜂窝壁相互接触，样品内部孔隙不断减小，应力迅速增加，直到最终孔格完全密实化。

进一步观察图 2 中三个不同规格与密度样品的应力 - 应变曲线，不难看出，对于相同的试样，动态压缩的稳态屈服平台应力均高于准静态压缩的，详细的结果将在下文给予进一步介绍。此外，值得注意的是，三个试样在准静态压缩(S-A, S-B, S-C)的弹性变形阶段，均表现出比其稳态屈服阶段所对应的平台应力大几乎 1 倍的失稳屈服极限应力；而动态压缩曲线上(D-A, D-B, D-C)，只有网格边长最小的 D-B 试样(边长 1 mm)表现出了类似的特性，边长较大的 D-A(边长 1.83 mm)、D-C(边长 1.5 mm)试样(尽管 D-C 试样与 D-B 试样有相同的边长/箔厚)，其失稳屈服极限应力还略低于其平台应力。由此可以看出，铝蜂窝在 3000 s^{-1} 高速压缩条件下，失稳屈服极限应力对边长非常敏感，边长越小的蜂窝，越容易获得比其稳态屈服平台应力高的失稳屈服极限应力。

3.2. 致密化应变和稳定屈服平台应力

从图 2 可以看出，无论试样是进行动态还是准静态压缩实验，其致密化应变不是一个固定值，通常

需要经过数据处理,将其量化为特征值,才便于深入研究。在本文中,采用将明显进入稳定屈服阶段的所有采集数据点进行平均的方法来获得稳定屈服平台应力,经多次测算,这种方法可以最大可能地排除因为弹性变形和致密化阶段曲线截断点不确定性带来的数据波动。致密化应变是指试样由稳定屈服阶段向致密化阶段转变的临界应变值,根据上述定义,不同的数据处理方法,得到的结果会有一些差异,但对于一组试样,采用同样的方法处理,其数据仍然具有可比性。目前虽然没有统一的规定,但文献中也都会提出各自的处理方法,如文献[10]提出可以由平台屈服阶段与致密化阶段切线交点来确定致密化应变。根据本文图2的应力-应变曲线可以看出,致密化阶段并不是一条直线,也就是说,其切线的斜率仍然是变化的,如果采用文献[10]的方法,显然会带来一定的模糊性。为此,本文由稳定屈服平台应力与致密化阶段曲线的交点来确定致密化应变。图2(d)是具体的实例,所得到平台化应力及致密化应变如图3所示。

由图3(a)可以看出,与准静态压缩特性相比,铝蜂窝在 10^3 s^{-1} 的应变率下变形时,平台应力明显增大,表现出明显的应变率敏感特性。而静态与动态的致密化应变(图3(b))则相差不大,表明动态与准静态压缩条件下,本文试验蜂窝的吸能原理相同,即都是失稳-折叠模式,这从图1中动态压缩后试样的形貌和图2的动态、准静态压缩特性曲线也可以看出。对比图3(a)三种铝蜂窝速的静、动态平台应力增加的程度会发现,尽管三种铝蜂窝的动态压缩应变率相同,其增加的程度却不相同,有的还相差很大。相对密度较小,边长最长的D-A试样,其增加程度最大,约为85.7%,而相对密度较大的D-B和D-C试样,具有相同的蜂窝边长/箔厚值,其增加程度约为39%~60%,其中边长较小的D-B试样,其增加程度又略高于D-C试样(高约20%)。显然,仅从材料的应变率敏感特性或蜂窝结构参数的简单对比出发,均不能很好地阐明上述三种铝蜂窝应变率敏感性的规律与机理。

对于铝蜂窝结构的应变率敏感性特性,目前还有不同的观点,如Han等[5]通过研究铝箔在静态加载(应变率 10^{-4} s^{-1})与动态加载(应变率 600 s^{-1})特性后,认为铝箔材料的应变率敏感特性对铝蜂窝的动态应变率敏感性影响有限;而Xu等[11]则提出铝蜂窝应变率敏感性的主要机制是蜂窝孔格中密闭的空气在动态应变中压缩,从而使得铝蜂窝应力增加;Shen等[12]在研究丝瓜络应变率效应中,发现高应变率下应变强化是导致其应变率敏感性的原因。本文的结果表明,铝蜂窝的相对密度、孔格大小及铝箔厚度均会影响其应变率敏感特性,应是材料特性-孔格参数-空气压缩特性三者联合作用的结果,详细阐明上述三方面因素对蜂窝应变率敏感特性的作用机理,是本文后续研究的一个重要方向。

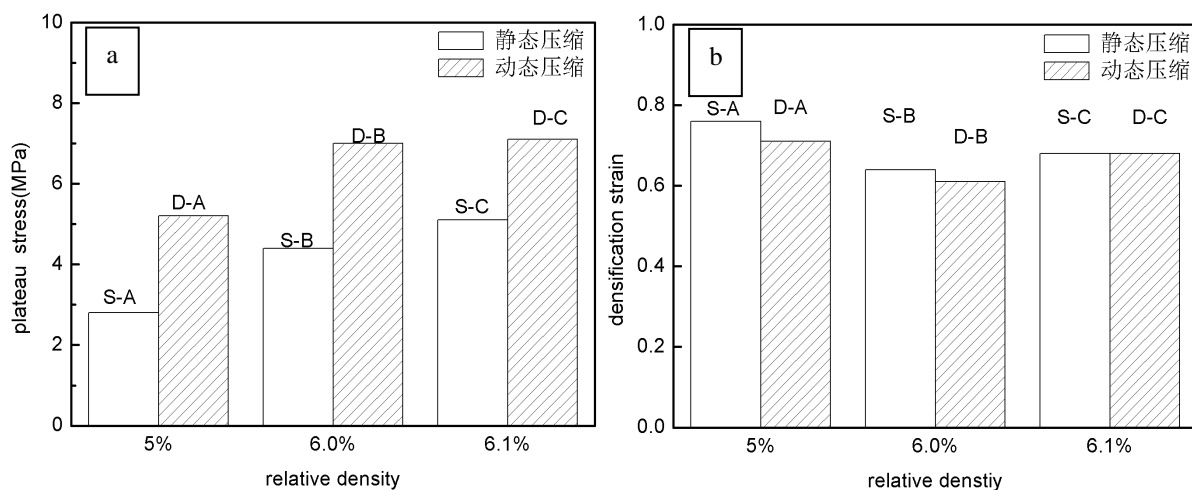


Figure 3. The platen stress (a) and densification strain (b)

图3. 平台应力(a)及致密化应变(b)

3.3. 动态能量吸收特性分析

3.3.1. 吸能能力

铝蜂窝在压缩过程中具有优良的吸能性能,当铝蜂窝被压缩时,外力所做的功通过蜂窝壁不断折叠,转化为铝蜂窝变形所需的塑性能。铝蜂窝单位体积吸收的能量(C)可以用应力(σ) - 应变(ε)曲线所包围的面积表征为:

$$c = \int_0^{\varepsilon_p} \sigma d\varepsilon \quad (2)$$

式中 ε_p 为压缩至致密化阶段前的应变变量, σ 、 ε 分别表示压缩应力和应变。

3.3.2. 吸能效率

作为一种较理想的吸能材料,该材料在致密化应变单位体积吸收能量与平台应力比值,是用来描述材料吸能特性的重要参数,即能量吸收效率,其表达式为:

$$E = \frac{\int_0^{\varepsilon_p} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma_p} \quad (3)$$

式中 ε_p 为压缩至致密化阶段前的应变变量, σ_p 为该材料平台应力, σ 、 ε 分别表示压缩应力和应变。

图 4(a)所示为在应变率为 10^3 s^{-1} 的情况下三种规格的铝蜂窝的压缩吸能情况。从图中可以看出,试样 D-A 的单位体积吸能约为 3.32 MJ/m^3 , 试样 D-B 的单位体积吸能约为 5.03 MJ/m^3 , 试样 D-C 的单位体积吸能约为 4.72 MJ/m^3 , 试样 D-A 的单位体积吸能明显低于试样 D-B 和 D-C。而试样 D-A 的相对密度也低于 D-B 和 D-C。

三个试样的能量吸收效率(E)如图 4(b)所示。从图中可以看出,达到平台应力前,随着应力快速增加,三个试样的 e 都很小,表明外力所作的功只有很小的一部分转化为弹性能储存在样品中,吸能效率低;应力达到了铝蜂窝的平台应力后,铝蜂窝壁屈曲,折叠,将外力所做功转化为塑性能,消耗了外力对铝蜂窝做功产生的大部分的能量,能量吸收效率急剧上升。随着铝蜂窝壁折叠完成,折叠铝蜂窝壁相互接触,开始进入致密化阶段,应力开始急剧上升,能量吸收效率又开始下降。从图 4(b)还可以看出,本文三种铝蜂窝试样密度与其吸能效率最大值的对应关系,正好与其吸能能力的对应关系相反,即密度较小的 D-A 试样的吸能效率高于密度较大的 D-B 和 D-C 试样。

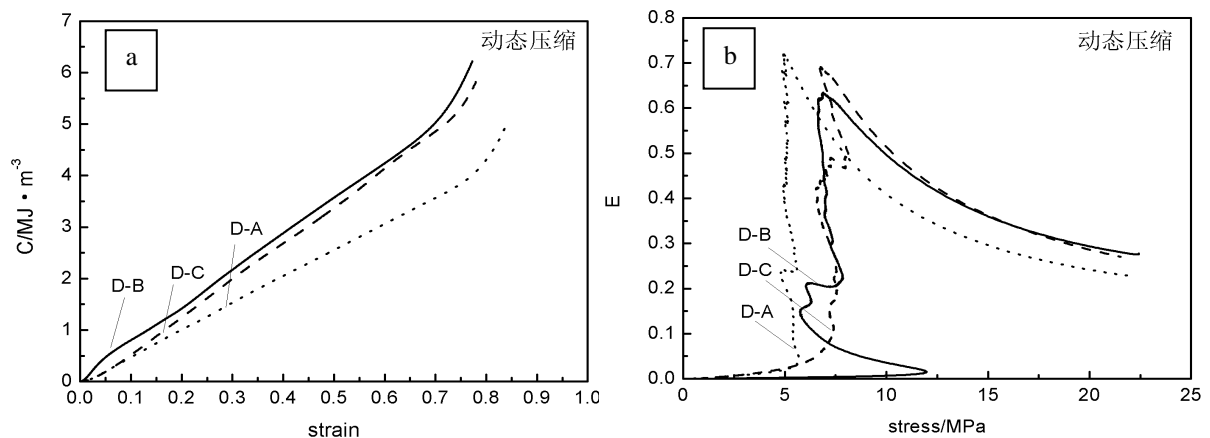


Figure 4. The energy absorption (a) and energy absorption efficiency (b) of aluminum honeycomb
图 4. 铝蜂窝的吸能能力(a)、吸能效率(b)

4. 结论

(1) 边长 1.0~1.83 mm, 厚度 0.04~0.06 mm, 相对密度 0.05~0.06 的三种 5052 H18 铝合金蜂窝在高应变速率条件下动态压缩与其准静态压缩的应力 - 应变曲线均具有明显的多孔材料三阶段特征, 即线弹性段, 塑性屈服平台段及致密段。塑性屈服平台的应变量大于 65%, 体积吸能能力为 3.32~5.03 MJ/m³, 最大吸能效率为 0.65~0.7。

(2) 在准静态压缩条件下, 本文三种试验铝蜂窝的失稳屈服极限应力明显高于稳态屈服平台应力, 在高应变率下, 只有边长为 1 mm 铝蜂窝的失稳屈服极限应力明显高于稳态屈服平台应力; 但三种铝蜂窝的稳态屈服平台应力均具有明显的应变率敏感特性, 应是材料特性 - 孔格参数 - 空气压缩特性三者联合作用的结果。

(3) 铝蜂窝边长/箔厚相同的两种蜂窝(边长 1.0 mm/箔厚 0.04 mm, 边长 1.5 mm/箔厚 0.06 mm), 其体积吸能能力与吸能效率差别不大, 在对动态失稳屈服极限没有明确要求的情况下, 可相互代换使用。

5. 展望

本文采用大直径分离式霍普金森压杆装置对铝蜂窝动态压缩力学特性和吸能性能进行了研究, 但是由于高应变速率下无法直接观察到铝蜂窝微观变形过程及变形过程中应力在蜂窝孔格壁的分布状态, 对铝蜂窝动态应变率敏感特性的作用机理研究不够透彻, 在下一步的工作中, 希望结合有限元数值模拟方法, 对铝蜂窝动态应变率敏感特性中材料特性、孔格参数、空气压缩特性的作用机制进行深入研究。

基金项目

国家重点基础研究发展计划(“973”)项目(编号: 2010CB731700, 2012CB619500); 高性能复杂制造国家重点实验室(中南大学)资助项目(编号: zzyjkt2013-03)。

参考文献 (References)

- [1] Gibson, L.J. and Ashby, M.F. (1997) Cellular solids: Structures and properties. 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge.
- [2] 王瑞, 林振荣, 卢玉松, 等 (2010) 泡沫铝复合材料的动态压缩实验研究及吸能分析. *兵器材料科学与工程*, **6**, 40-43.
- [3] 杨益, 李晓军, 郭彦朋 (2010) 夹芯材料发展及防护结构应用综述. *兵器材料科学与工程*, **4**, 92-95.
- [4] Yamashita, M. and Gotoh, M. (2005) Impact behavior of honeycomb structures with various cell specifications numerical simulation and experiment. *International Journal of Impact Engineering*, **32**, 618-630.
- [5] 陈金宝, 聂宏, 柏合民 (2008) 月球着陆条件对铝蜂窝材料缓冲性能的影响. *机械工程材料*, **1**, 48-50.
- [6] 王闯, 刘荣强, 邓宗全, 等 (2008) 蜂窝结构的冲击动力学性能的试验及数值研究. *振动与冲击*, **27**, 56-61.
- [7] 卢芳云, Chen, W. and Frew, D.J. (2002) 软材料的 SHPB 实验设计. *爆炸与冲击*, **22**, 15-19.
- [8] 姜锡权, 陶洁, 王玉志 (2007) 改进的霍普金森压杆技术在聚氨酯泡沫塑料动态力学性能研究中的应用. *爆炸与冲击*, **27**, 358-365.
- [9] 邹广平, 唱忠良, 明如海, 等 (2009) 泡沫铝夹心板的冲击性能研究. *兵工学报*, **12**, 276-279.
- [10] Paul, A. and Ramamurty, U. (2000) Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminum foam. *Material Science and Engineering A*, **281**, 1-7.
- [11] Xu, S., Beynon, J.H., Ruan, D., et al. (2012) Strength enhancement of aluminium honeycombs caused by entrapped air under dynamic out-of-plane compression. *International Journal of Impact Engineering*, **47**, 1-13.
- [12] Shen, J.H., Xie, Y.M., Huang, X.D., et al. (2013) Behaviour of luffa sponge material under dynamic loading. *International Journal of Impact Engineering*, **57**, 17-26.