DOI: 10.11883/1001-1455(2015)01-0016-06

基体材料对铝蜂窝动态强化特性的影响*

谭思博[1],侯 兵[1],李玉龙[1],赵 涵[2]
(1. 西北工业大学航空学院,陕西 西安 710072;
2. LMT 实验室,法国卡尚高等师范学校/法国国家科研中心 8535 混合研究单位/巴黎第六大学,法国 卡尚 94235)

摘要: 为了明确基体材料对铝蜂窝动态强化行为的影响,首先从铝蜂窝结构中取出蜂窝壁,制成小试样并对其进行了力学性能测试,然后对几何参数相同而基体材料不同的 2 种铝蜂窝材料分别进行了单轴面外静态和动态压缩实验。实验结果表明,2 种铝蜂窝均存在明显的动态强化现象,但动态强化率存在显著差异。横向惯性理论可以解释蜂窝的动态强化行为和强化率的差异:基体材料应变硬化率高的铝蜂窝,其面外方向的动态强化现象相对更显著。

关键词: 固体力学;基体材料;动态强化;铝蜂窝;面外压缩
中图分类号: O347.3 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

铝蜂窝材料是一种二维多孔材料,具有密度小、成本低、变形能力强的特点,是一种优良的吸能材料,广泛应用于各种轻质结构和缓冲吸能结构中[1-3]。

近年来,很多学者对铝蜂窝的静态变形规律做了深入研究,但对其动态力学性能仍然了解较少。已有研究表明,当基体材料本身率不敏感时,蜂窝材料在面外动态加载下仍存在明显的强化效应。W. Goldsmith[4]对蜂窝结构进行了动态压缩实验,测得蜂窝动态强化率为 20%~50%。H. Zhao 等[5]对铝蜂窝进行了 SHPB 实验,测得其动态强化率约 40%。对于多孔材料的动态强化,目前学界主要有 3 种解释:封闭气体压缩理论[2],冲击波理论[6-7]和横向惯性效应理论[8-10]。其中,横向惯性效应理论可以较好地解释中等速度冲击下,蜂窝材料动态强化这一现象。该理论认为,结构在动态加载下,由于惯性的存在,其横向运动需要一定的时间才会与纵向加载的速度相协调,这种运动的不协调性导致结构的纵向压缩应变较静态时有所增加。具有应变硬化特性的材料则会出现强化现象。

为了进一步研究基体材料对铝蜂窝动态力学性能的影响,验证横向惯性效应理论,本文中从铝蜂窝结构中取出蜂窝壁,对基体材料进行力学性能测试。对几何参数相同而基体材料不同的 2 种铝蜂窝分别进行单轴面外动态和静态压缩实验。最后结合横向惯性效应理论分析基体材料对铝蜂窝动态强化行为的影响。

1 实验方法

选择 3003H18 和 5052H18 铝蜂窝进行基体材料实验、蜂窝的静态压缩和动态压缩实验。2 种铝蜂窝的几何尺寸完全相同,高度 30 mm,蜂窝芯格平均边长 $a=3$ mm,铝箔厚度 $t=60$ μm。

1.1 基体材料实验

构成蜂窝的铝箔与块体铝合金的力学性能有很大不同,用块体铝合金的本构关系描述蜂窝基体材料力学行为存在较大误差。因此有必要获得蜂窝壁的本构关系,为描述蜂窝结构的力学行为奠定基础。

从 2 种铝蜂窝上分别截取蜂窝壁进行静态拉伸实验。考虑到线切割加工可能会影响蜂窝壁的力学性能,从蜂窝结构上沿壁板交界的折痕取下矩形铝箔试样用于实验,结果表明,其精度完全满足实验要求。截取的蜂窝壁为矩形,长 30 mm、宽 3 mm、厚 60 μm。由于蜂窝壁太薄,制成哑铃状试样难以保证

* **收稿日期**: 2013-05-31; **修回日期**: 2013-09-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(11202168)
第一作者: 谭思博(1989—),男,硕士研究生;**通讯作者**: 李玉龙,liyulong@nwpu.edu.cn。

精度，直接拉伸矩形铝箔又会因夹具夹持造成应力集中，所以实验难度较大。此外，夹持式引伸仪因试样太薄无法使用，视频引伸仪也因试样太短而无法直接使用。考虑到以上问题，将截取的铝蜂窝壁两端分别粘接 2 个与其宽度相同的铝箔，制成拉伸试样，用粘接的方式代替夹具直接对试样的夹持，如图 1 所示。粘接而成的试样结构紧凑，不受夹具的遮挡，因此可以利用视频引伸仪来测定试样的应变。实验机采用 INSTRON5848 型微拉伸实验机，加载速度为 0.1 mm/min(向上运动)。

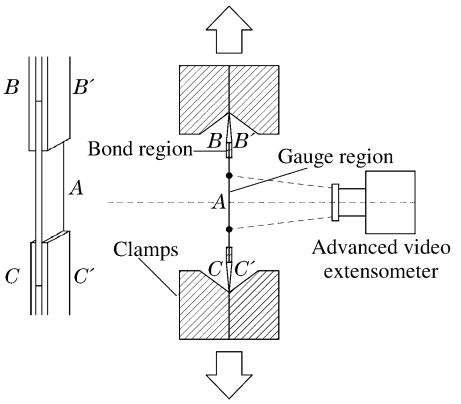

图 1 铝箔拉伸试样和铝箔拉伸实验

Fig. 1 Specimen and schematic of foil-tension experiment

1.2 蜂窝压缩实验

将蜂窝静态压缩试样加工成六棱柱结构，该试样共有 19 个封闭的胞元，形状如图 2 所示。试验机采用 CSS88010 万能电子试验机。加载速度设为 0.1 mm/s(向下运动)。

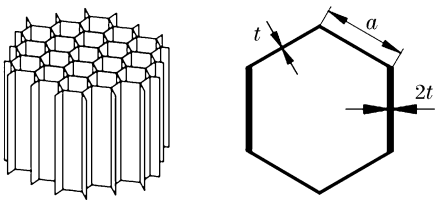

图 2 蜂窝试样和胞元尺寸

Fig. 2 Specimen of honeycombs and its cell diameter

铝蜂窝动态压缩试样与静态试样完全相同。采用 SHPB 系统进行测试，平均加载速度分为 10 m/s 和 28 m/s 两种。SHPB 系统由发射系统、撞击杆、入射杆、透射杆和信号采集系统组成。试样处于入射杆和透射杆之间。撞击杆以一定的速度撞击入射杆。应力波经入射杆传播后在入射杆端发生反射和透射，贴在杆子上的应变片可以记录下入射、透射和反射的信号。

铝蜂窝材料分散性较大，为使试样截面内包含多个胞元，试样截面要足够大，因此实验采用大直径压杆。另外，铝蜂窝材料的波阻抗比常规压杆材料的波阻抗低很多，因此采用低波阻抗的 PMMA 压杆，以提高试样和压杆波阻抗的匹配性。杆子直径 30 mm，入射杆和透射杆的长度均为 2 m。为了在有限的发射气压下完成较高速度的加载，选取 290 mm 长的撞击杆进行实验，结果表明采用该长度的撞击杆可以使试样发生足够大的变形，满足后续研究的需要。通过入射、反射和透射信号得到试样两个端面上的力和速度的信息，其计算公式如下[5]：

$$F_{\mathrm{in}}(t)=S_{\mathrm{b}}E[\varepsilon_{\mathrm{i}}(t)+\varepsilon_{\mathrm{r}}(t)] \tag{1}$$

$$F_{\mathrm{out}}(t)=S_{\mathrm{b}}E\varepsilon_{\mathrm{t}}(t) \tag{2}$$

$$v_{\mathrm{in}}(t)=c_0[\varepsilon_{\mathrm{i}}(t)-\varepsilon_{\mathrm{r}}(t)] \tag{3}$$

$$v_{\mathrm{out}}(t)=c_0\varepsilon_{\mathrm{t}}(t) \tag{4}$$

式中：F_{in}、F_{out}、v_{in} 和 v_{out} 分别为试样表面的力和速度。S_{b}、E 和 c_0 分别为压杆的横截面积、杨氏模量和弹性波速。$\varepsilon_{\mathrm{i}}(t)$、$\varepsilon_{\mathrm{r}}(t)$ 和 $\varepsilon_{\mathrm{t}}(t)$ 分别为入射、反射和透射脉冲。

2 实验结果分析

2.1 基体材料实验

蜂窝壁拉伸的实验结果如图 3 所示。实验结果表明，5052H18 铝箔的强度和破坏应变均高于 3003H18 铝箔。3003H18 的破坏应变在 1.3% 左右；5052H18 的破坏应变明显高于

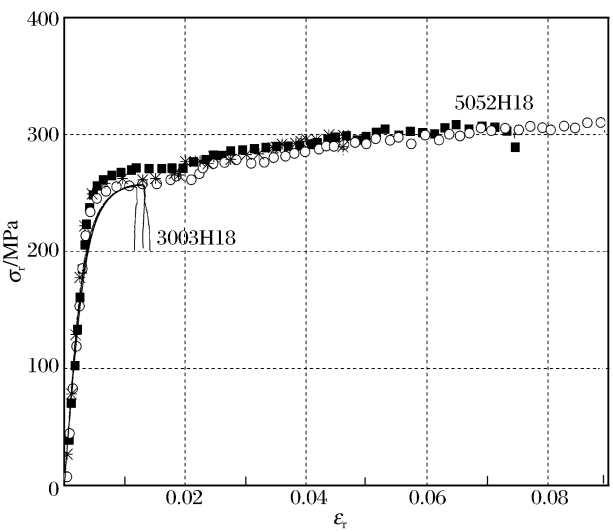

图 3 拉伸实验中 2 种铝箔的真实应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of two kinds of aluminium foil

3003H18,但表现出一定的分散性,这可能与 5052H18 试样边界的粗糙度不同有关。

2.2 蜂窝压缩实验

定义平均应力 $\sigma=F/S$ 来反映蜂窝在稳态压溃过程中的载荷大小,其中 F 为试验机载荷,S 为铝蜂窝试样的横截面积。蜂窝试样横截面积的计算采用等效面积法,即每一个“Y”形结构对应一个三角形区域的面积,如图 4 所示。等效面积的计算公式为

$$S=3\sqrt{3}na^2/2 \tag{5}$$

式中:S 为等效截面积,n 为截面中“Y”型单元的个数,a 为六边形边长。19 孔蜂窝试样有 54 个“Y”形单元,试样等效的截面积为 631.8 mm^2。后文动态实验也用此方法得到试样的平均应力。由于铝蜂窝的压溃模式为非均匀的渐进式屈曲,所以本文中以平均应力-位移曲线来描述蜂窝结构的变形行为。对每种材料的每种加载状态都进行了多次实验,实验结果的一致性较好,图 5 为 2 种铝蜂窝的平均应力位移曲线。

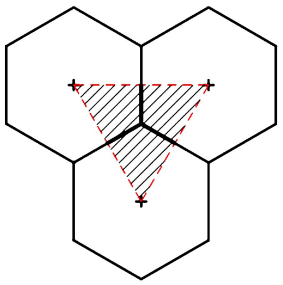

图 4 蜂胞的等效横截面

Fig. 4 Equivalent cross-sectional area of honeycombs

蜂窝试样胞元较少,分散性可能比较大,所以对不同胞元数目的铝蜂窝试样进行了准静态压缩实验,以验证采用 19 孔蜂窝作为试样的合理性。我们定义平均应力 σ 在不同位移 x 处的平均值为平台应力 σ_p。实验结果(图 6)表明,胞元数目对铝蜂窝的平台应力 σ_p 影响较小。所以,19 孔蜂窝试样在力学性能上具有一般性,基本可以代表此类蜂窝结构。

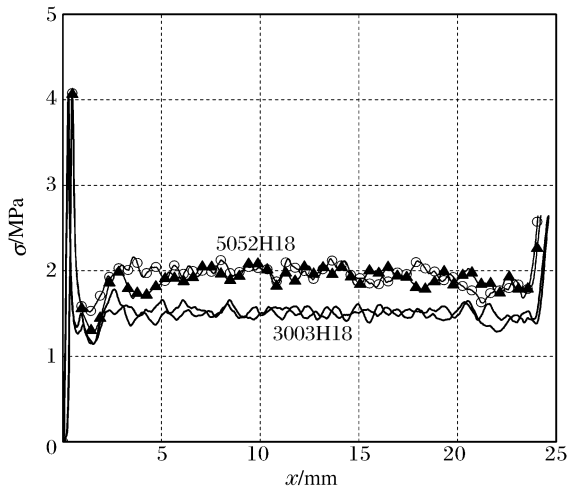

图 5 铝蜂窝静态单轴压缩实验的重复性

Fig. 5 Static compression test of aluminium honeycombs

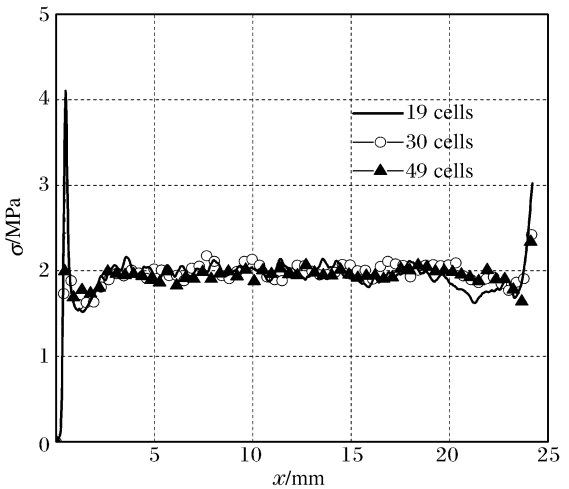

图 6 不同胞元数目蜂窝的平均应力 σ 比较

Fig. 6 Nominal stress of honeycombs with different cells

实验结果表明,铝蜂窝结构静态压缩过程分为 3 个阶段:第 1 阶段从初始加载点到初始应力峰值。在该阶段内,蜂窝最初保持挺直的状态,随着载荷的增大,出现了整体的弹性或弹塑性屈曲,此时沿着整个蜂窝高度方向上存在均布的波纹,当达到初始应力峰值时,蜂窝局部发生压溃。其本质是结构的失稳。第 2 阶段为平台段,蜂窝以渐进的方式发生屈曲(图 7),压溃区域逐渐扩展。该阶段内,载荷明显小于初始峰值,并稳定在某一应力水平附近。需要指出的是,渐进屈曲和整体的波纹屈曲是 2 种不同的屈曲模式。第 3 阶段为压实段,蜂窝进入密实化阶段,载荷明显增大。由图 7 可以看到,铝蜂窝在动态和准静态加载下的屈曲模式完全相同(由于动态实验撞击杆的长度有限,所以动态实验的铝蜂窝没有完全压实)。图 8 为铝蜂窝动态压缩实验的波形图(5052H18,28 m/s)。图 9 为 2 种基体材料蜂窝的动态和准静态实验结果。

从图 9 中可以看到,5052H18 铝蜂窝的平台应力高于 3003H18 铝蜂窝,这与基体材料实验的结果(图 3)一致。3003H18 和 5052H18 铝蜂窝渐进屈曲产生的褶皱均为 12 个,基体材料力学性能的差异

并未使褶皱波长出现显著差异。

定义蜂窝的动态强化量 $\Delta\sigma$ 为蜂窝动态加载下的平台应力与准静态加载下的平台应力之差，动态强化率 γ 为动态强化量 $\Delta\sigma$ 与静态平台应力之比。综合准静态实验和动态实验的结果，发现 2 种铝蜂窝均存在明显的动态强化现象。3003H18 铝蜂窝在动态加载下的强化量和强化率都比 5052H18 铝蜂窝高(表 1)。从实验结果来看，随着加载速度的增加，2 种铝蜂窝的动态强化率和动态强化量都有所增加。

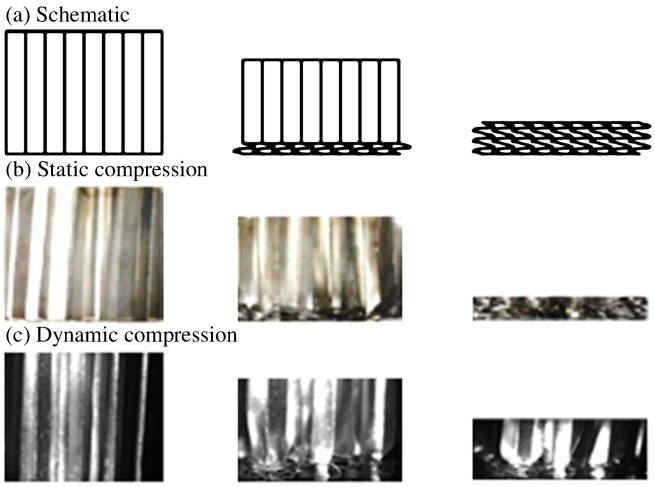

图 7 蜂窝压缩的渐进屈曲

Fig. 7 Progressive buckling of honeycombs

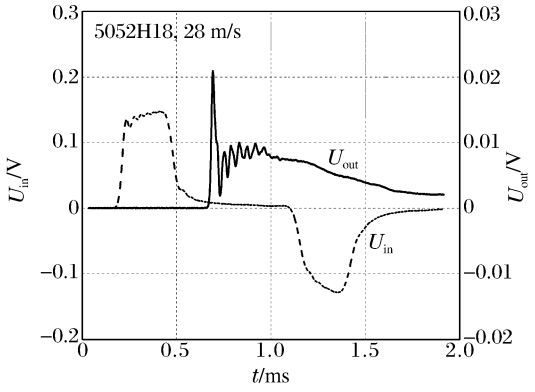

图 8 蜂窝动态压缩信号

Fig. 8 Signals of SHPB test of aluminium honeycombs

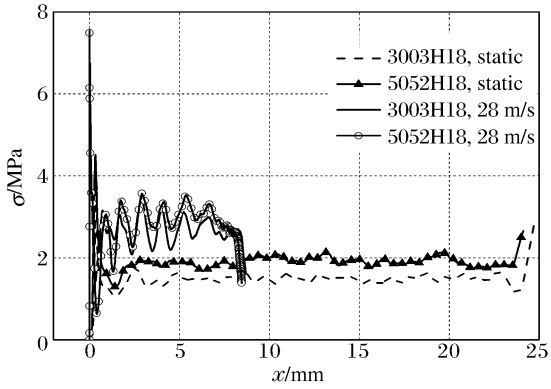

图 9 2 种基体材料蜂窝的动态和准静态平均应力位移曲线

Fig. 9 Nominal stress-displacement curves of honeycombs under static and dynamic loading

表 1 不同基体材料蜂窝的平台应力

Table 1 Plateau stress of honeycombs with different materials

材料/加载速度	σ_p/MPa	$\Delta\sigma$/MPa	γ/%
3003H18 (0.1 mm/s)	1.51		
3003H18 (10 m/s)	2.21	0.70	46
3003H18 (28 m/s)	2.40	0.89	59
5052H18 (0.1 mm/s)	1.91		
5052H18 (10 m/s)	2.44	0.53	28
5052H18 (28 m/s)	2.66	0.75	39

研究表明，铝合金的率敏感性与其静态流变应力有关[11]，流变应力较大的铝合金几乎没有应变率敏感性。这样，对于流变应力较大的 3003H18 和 5052H18 铝合金，认为其本身率不敏感。所以我们认为铝蜂窝的动态强化与蜂窝材料的几何结构有关。该现象可以用横向惯性效应理论给予定性的解释，H. Zhao 等[9]用刚性杆-塑性铰模型对具有动态强化特性的结构进行了描述，如图 10 所示。其中 M_p 为塑性铰力矩，θ 为初始缺陷角，v 为横向位移，σ_s 为材料屈服强度，L 为杆长，b、t 为杆子矩形截面边长。由力的平衡原理得到杆子塑性失稳的临界外载为

$$F = M_p \left| \frac{2\delta\theta}{2\delta v} \right| = \frac{\sigma_s b t^2}{4L\sin\theta} \tag{6}$$

集中质量以加速度 a 沿 x 轴正方向运动，它与杆子的轴向力满足以下关系：

$$2N\sin\theta = ma \tag{7}$$

在静态压缩下横向运动与纵向运动几何协调。然而在动态加载下，整个结构沿壁板纵向的压缩载荷要受杆子塑性流动应力大小的限制

$$ma \leqslant 2\sigma_s bt\sin\theta \tag{8}$$

这意味着受到横向惯性的影响，蜂窝壁横向运动对纵向压缩的协调能力有限。所以，动态压缩下铝蜂窝壁塑性失稳时的纵向应变较静态时有所增大，即铝蜂窝壁在纵向发生更大的塑性变形。

假设 5052H18 在塑性阶段的应变硬化率小于 3003H18，而 2 种铝蜂窝的动态应变增量相同(均为 $\Delta\varepsilon$)，那么 3003H18 铝蜂窝的动态强化量就会高于 5052H18 铝蜂窝。但由于实验中 3003H18 铝箔过脆，所以未能获得足够长的强化段曲线。我们猜想，在压缩情况下，3003H18 和 5052H18 符合以下定性的关系，如图 11 所示。另外，5052H18 铝合金的静态强度较 3003H18 铝合金高，这使得在应变强化量相同的情况下，5052H18 铝蜂窝的动态强化率要比 3003H18 铝蜂窝低。

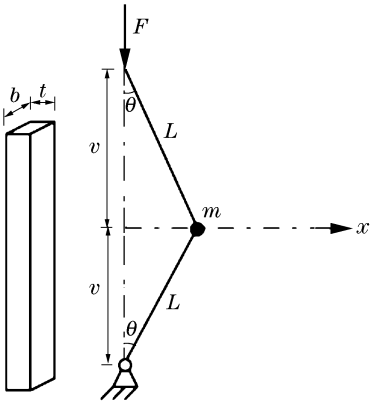

图 10 刚塑性杆模型[9]

Fig. 10 Rigid-plastic hinge model [9]

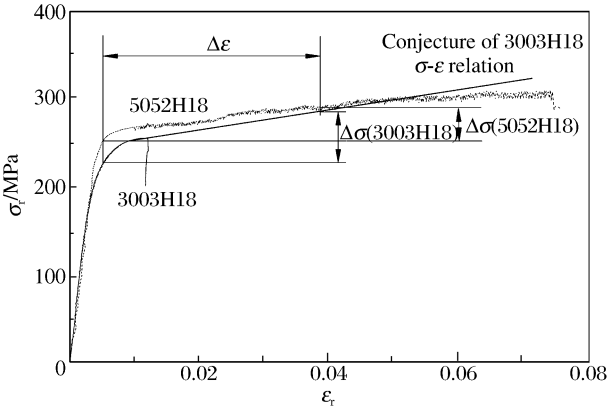

图 11 铝蜂窝强化的横向惯性效应原理

Fig. 11 Lateral inertia theory of aluminium honeycombs

3 结 论

对几何参数完全相同而基体材料分别为 3003H18 和 5052H18 铝合金的 2 种铝蜂窝进行了动态和静态的力学性能测试，获得了 2 种蜂窝在面外方向上动态和静态的平台应力，并得到了各自的动态强化量和动态强化率。同时对以上 2 种铝蜂窝的基体材料进行了力学性能测试，得到了其应力应变曲线。利用横向惯性效应模型对 2 种铝蜂窝的动态强化率的差异进行了分析，得到如下结论：

(1)铝蜂窝在面外单轴动态加载下的变形模式与静态加载时相同。

(2)3003H18 铝蜂窝和 5052H18 铝蜂窝存在明显的动态强化效应。3003H18 铝蜂窝的动态强化率(59%)要高于 5052H18 铝蜂窝的动态强化率(39%)(平均加载速度为 28 m/s)。这一现象可能与基体材料的应变硬化率有关。

(3)基体材料对蜂窝整体力学性能有着重要的影响。5052H18 铝蜂窝的平台应力在准静态时比 3003H18 铝蜂窝高 26%，在 28 m/s 动态加载下比 3003H18 高 11%。

参考文献：

[1] Gibson L J, Ashby M F. 多孔固体结构与性能[M]. 2 版. 北京：清华大学出版社，2003：81.

[2] Zhou Q, Mayer R. Characterization of aluminium honeycomb material failure in large deformation compression, shear, and tearing[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2002, 124(4): 412-420.

[3] Crupi V, Epasto G, Guglielmino E. Comparison of aluminium sandwiches for lightweight ship structures: Honeycomb vs. foam[J]. Marine Structures, 2013, 30: 74-96.

[4] Goldsmith W, Sackman J L. An experimental study of energy absorption in impact on sandwich plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 1992,12(2):241-262.

[5] Zhao H, Gary G. Crushing behavior of aluminium honeycombs under impact loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998,21(10):827-836.

[6] Reid S R, Peng C. Dynamic uniaxial crushing of wood[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997,19(5/6):531-570.

[7] Zheng Z J, Yu J L, Wang C F, et al. Dynamic crushing of cellular materials: A unified framework of plastic shock wave models[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013,53:29-43.

[8] Calladine C R, English R W. Strain-rate and inertia effects in the collapse of two types of energy-absorbing structure[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1984,26(11/12):689-701.

[9] Zhao H, Abdenadher S. On the strength enhancement under impact loading of square tubes made from rate insensitive metals[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004,41(24/25):6677-6697.

[10] Hou B, Zhao H, Pattofatto S, et al. Inertia effects on the progressive crushing of aluminium honeycombs under impact loading[J]. International Journal of Solids and Structures, 2012,49(19/20):2754-2762.

[11] 高玉华. 铝合金 LC4 和 LY12CZ 在高应变率拉伸和压缩下的本构关系[J]. 材料科学与工艺,1994,2(2):24-29.
Gao Yu-hua. Dynamic compression and tensile properties of Al alloys LC4 and LY12CZ at high strain rate[J]. Material Science & Technology, 1994,2(2):24-29.

Effect of base materials on the dynamic enhancement of aluminium honeycombs

Tan Si-bo[1], Hou Bing[1], Li Yu-long[1], Zhao Han[2]

(1. *School of aeronautics, Northwestern Politrchnial University*, 710072 *Xi'an*, *China*;
2. *Laboratorie de Mécanique et Technologie*, *ENS-Cachan/CNRS-UMR* 8535/
Uneversité Paris 6, 61 *avenue du president Wilson*, 94235 *Cachan cedex*, *France*)

Abstract: In order to clarify the influence the base materials have on aluminium honeycombs and to explore the difference of the buckling modes between dynamic and static compression, research of honeycombs with different base materials (3003H18 and 5052H18 aluminium alloy) was done. Test on specimens cut from aluminium honeycombs was conducted to investigate the uniaxial tension mechanical properties of base materials in this study. Both quasi-static and dynamic experiments on aluminium honeycombs with same geometry but made of different base materials were conducted. The quasi-static test was performed using universal tester with the loading speed of 0.1 mm/s and an "SHPB" system with large diameter PMMA bars was adopted in dynamic test with two average impact speeds (10 m/s and 28 m/s). High speed camera was applied in "SHPB" test to capture the image of the dynamic deformation of aluminium honeycomb structure. The test results showed that three stages can be divided in the compression of honeycombs and the buckling modes of different aluminium honeycombs under different loading speeds were the same. Dynamic enhancement existed in two kinds of aluminium honeycombs but with different enhancement ratios. The dynamic enhancement of 3003H18 honeycombs was more remarkable than that of 5052H18. Inertia theory can explain the enhancement. With the analysis of the result of base-material experiment, consumption was made that Honeycombs with a higher strain hardening rate tend to have a more remarkable enhancement.

Key words: solid mechanics; base material; dynamic enhancement; aluminium honeycombs; out-of-plane compression

(责任编辑　曾月蓉)