

文章编号: 1001-4888(2011)05-0573-09

低速冲击下蜂窝铝板的表面变形 检测及其吸能特性研究^{*}

王刚, 李喜德

(清华大学 航天航空学院工程力学系, 北京 100084)

摘要: 铝质蜂窝结构由于其优良的物理和机械性能被广泛地应用于工程结构, 因而对其力学性能的研究也成为越来越重要的课题。本文通过摆锤冲击实验, 研究了蜂窝铝的动态压缩性能及低速冲击吸能特性。结果表明, 在球形摆锤冲击下, 蜂窝铝结构具有很好的冲击吸能特性, 其变形特征与准静态变形类似。研究中通过高速摄像系统和加速度传感器记录摆锤的加速度衰减过程, 通过投影光载波技术获得受冲击蜂窝铝板表面的压缩行为和三维变形形貌。最后利用有限元方法进一步分析了蜂窝铝结构中内部损伤形式等实验中无法观测的现象, 并对蜂窝铝结构参数对其吸能行为的影响进行了详细的讨论。

关键词: 蜂窝铝; 轴向冲击; 能量吸收; 三维形貌测量

中图分类号: O347.3; U461.91

文献标识码: A

0 引言

蜂窝铝结构是典型的多胞材料, 通常用作芯层结构, 具有良好的能量吸收特性, 被广泛用于汽车和航空航天等重要工业领域。以往的研究结果显示, 蜂窝材料受到轴向压力时, 其变形主要有线弹性变形、弹性屈曲和塑性坍塌三种模式^[1-4]。其中塑性坍塌是蜂窝结构能量吸收的最主要因素, 而坍塌的力学机制是由于六边形蜂窝体轴向塑性屈曲, 孔壁按一定波长渐进折叠, 而且该波长通常约等于六边形的孔边长。从宏观力学行为看, 蜂窝铝受轴向压缩时的应力应变曲线具有较长的低应力平台区, 是理想的吸能材料。

有关轴向冲击下多胞材料的性能研究很多都集中于高应变率方面^[3], 相关的实验技术也比较完善, 比如分离式 Hopkinson 压杆技术和气炮技术等。相比高能量载荷, 低速冲击的情况在汽车行人保护等领域更为常见, 因此研究中低速载荷下材料或结构的吸能行为对汽车行人保护具有重要的意义。目前, 中低速加载的主要实验技术有落锤、滑轨、摆锤等。

本文应用摆锤冲击实验研究蜂窝铝的动态压缩性能及低速冲击吸能特性。使用摆锤冲击实验是因为摆锤的速度在碰撞压缩过程中不是常数, 而是随位移而变化直至完全停下来或者继续反弹, 因此这种试验方式能够较好的模拟实际碰撞事件。同时, 为了直观地获得冲击后蜂窝结构受压缩后的三维变形, 将结构光三维投影形貌测量技术引入本文的实验中, 可以在碰撞后原位获得摆锤碰撞后蜂窝结构的三维形貌。与此同时, 建立类似真实结构的有限元模型进行数值计算模拟, 用于结构变形和胞元微结构的

^{*} 收稿日期: 2011-05-09; 修回日期: 2011-09-14

基金项目: 本研究由国家自然科学基金(10972113, 10732080)、国家重点基础研究发展计划(2007CB936803, 2010CB631005)和高等学校博士学科点专项科研基金(20070003053)资助。

通讯作者: 李喜德(1964—), 男, 教授, 主要从事实验固体力学、微纳力学的研究。E-mail: lixide@tsinghua.edu.cn

变形与损伤分析。为了监视整个摆锤的运动和获得输入的能量,在实验过程中还应用高速摄像系统全程记录了摆锤的撞击过程。

1 实验

1.1 蜂窝铝试件

本文研究的蜂窝铝材料由联众博雅复合板公司生产。蜂窝铝芯材料为铝锰合金(牌号为 3003H18),蒙皮为工业纯铝,二者均为轧制成型。蜂窝铝芯为正六边形结构,厚度 0.05mm,棱长 5mm,高度为 18.6mm;蒙皮厚度为 0.8mm,粘接在铝芯的表面构成蜂窝铝板,总厚度为 20.2mm,如图 1 所示。

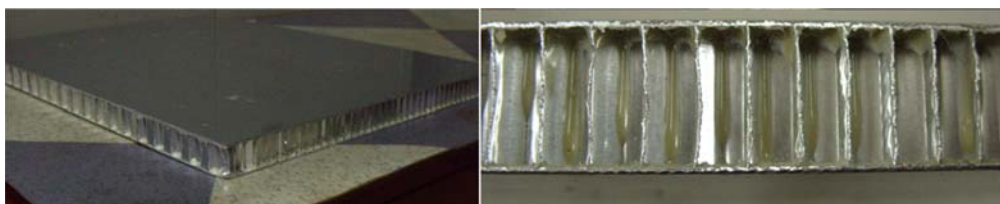


图 1 蜂窝铝板:实验用试件及蜂窝铝芯结构

Fig. 1 Honeycomb panel: the sample and its cellular structure



图 2 摆锤冲击测量系统

Fig. 2 Pendulum impact testing system

1.2 实验系统

实验系统由三部分组成:摆锤冲击单元、三维形貌测量单元和测量摆锤运动的高速摄像单元,如图 2 所示。其中高速摄像单元在图 2 的拍摄者位置,因此没有显示在画面中。摆锤为铸铁制圆球,半径为 57mm,重量 5kg。由一根坚韧的细绳悬吊在钢结构架上。球背面贴加速度传感器,用于测量冲击时的加速度变化。结构光三维形貌测量单元投影正弦光栅到蜂窝结构表面,图像系统记录物体表面受高度调制的空间变形投影条纹,然后通过傅立叶载波分析方法获得冲击后蜂窝结构的三维变形场^[10-11]。高速摄像单元(Roper, Motion ProX3)从摆锤在初始位置开始到冲击、回弹结束,以每秒 500 帧的速度记录摆锤的运动图像。在后续处理

中,通过高速序列图像精确地捕捉到摆锤初始摆角和冲击反弹后摆锤到最高位置的摆角,进而计算得到冲击前后的速度。

在实验前,为了估计摆锤冲击系统自身的能量损耗,利用一弹簧代替蜂窝吸能结构进行冲击实验。从弹簧的变形检测结果看,在冲击速度小于 5m/s 的情况下,冲击系统吸收的能量平均不超过总能量的 5%。因此可以近似认为该系统是稳定和理想的。另外为了减少摆锤和蜂窝表面摩擦的影响,实验中在球和蜂窝铝板接触面上分别涂抹少量的凡士林以提高界面的润滑特性。

1.3 实验结果

检测中完成了三种速度下的蜂窝铝受冲击实验,相关测量结果见表 1。图 3 给出了摆锤冲击加载时对应的加速度曲线。

表1 不同冲击速度下的实验测量参数

Tab.1 Parameters of impact tests

序号	落差高度 (m)	冲击前速度 (m/s)	反弹速度 (m/s)	吸收能量 (J)	变形体积 (mm ³)	单位体积 吸能(J/cm ³)
1	0.566	3.311	0.384	27.038	9712	2.784
2	0.904	4.210	0.560	43.526	14325	3.038
3	1.250	4.950	0.653	60.190	21478	2.802

由图3可见,摆锤冲击时间约为5.8ms,加速度峰值在160g以下。在以往的研究中^[3],落锤以4m/s的速度冲击地面时,冲击时间仅为1ms,其加速度峰值可达1000g以上。可见该蜂窝铝板具有良好的冲击吸能能力。图3中也清楚地显示,冲击速度越高,加速度峰值越高,并且冲击的时间历程也越长。加速度曲线开始时刻为摆锤与蜂窝铝板的接触时刻,结束时刻为与摆锤的分离时刻。曲线所包围的面积即为冲击前后摆锤的速度变化量。从冲击速度3m/s、4m/s和5m/s三个等级的曲线特征来看,4m/s组实验的加速度上升较快,这会导致曲线包围面积相同的情况下加速度峰值减小,有利于冲击吸能。图4给出了这一速度冲击下蜂窝铝板表面变形的形貌测量结果。

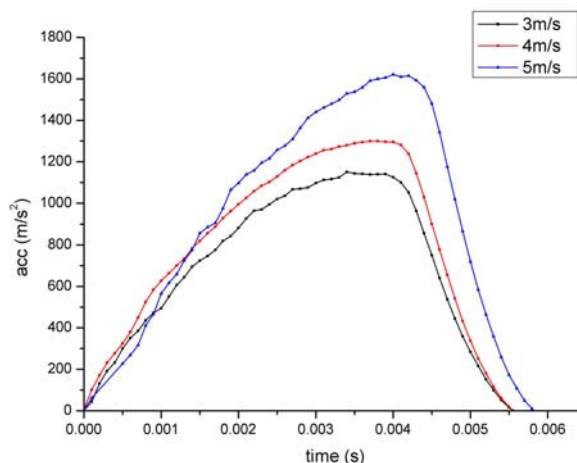


图3 三种速度下摆锤的冲击加速度

Fig.3 Curves of accelerations and times

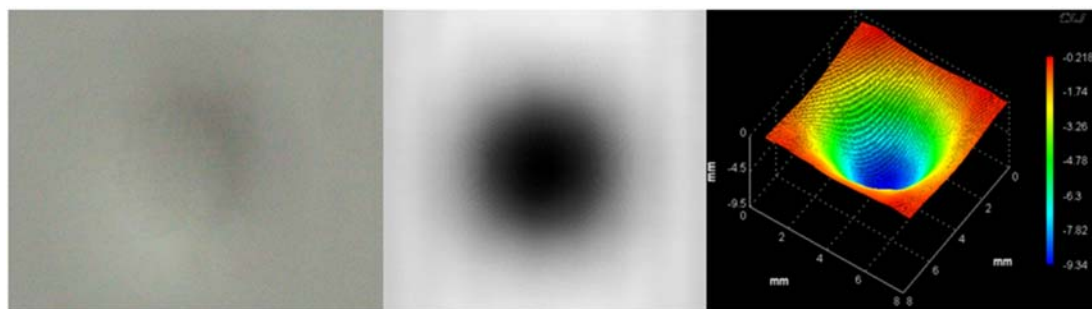


图4 冲击速度为4m/s时蜂窝铝板表面变形照片和用结构光投影重建的变形形貌的灰度显示图及三维图

Fig.4 Photograph and 3-D deformation field reconstructed with the projection profile for a deformed honeycomb panel impacted at 4m/s

得到变形形貌后即可通过对形貌高度积分得到变形体积,即变形后表面凹坑的体积。然后根据冲击前后摆锤速度的变化得到吸收能量,最后可算出每单位体积的冲击能(表1)。用Janssen因子法^[2]评价结构的吸能性能时,最优的单位体积冲击能对应着最高的吸能效率。图5展示了三种冲击速度下的吸收能量行为。发现在不同的冲击速度下,蜂窝铝板吸收的能量大小和变形体积之间呈近似线性的关系,每单位体积吸收的能量相差不大。因此对于本文实验用蜂窝吸能结构,可根据不同速度冲击实验得到的结果拟合合成经验公式,用于事故还原。

图6为蜂窝结构表面变形的凹坑中心截面深度曲线,其中红色虚线为摆锤的轮廓。从图中可以发现,蜂窝铝板表面的变形形状与冲击摆锤形状并不相同,因为蜂窝铝板表面有一层较为坚韧的蒙皮,受到冲击时接触区域变形会带动周围蒙皮变形,进而引发周围蒙皮对内部蜂窝铝芯施压造成其屈曲变形。这种模式相当于增加了接触面积,提高了吸能能力。如果冲击速度比较大,摆锤中心位置对应的应变可

能已经达到图 7 的压实段,使反力迅速增加,而蒙皮带来的这种周边连带效应可以通过和周围区域强连接的方式避免这种压实情况的出现,从而提高缓冲吸能的效果。从图 7 蜂窝铝平压实验得到的应力应变曲线可以看到明显的三个阶段:弹性段、平台段和压实段。稳定的长程平台段是蜂窝铝结构具有良好吸能性能的主要原因。平台段之前出现的初始峰值是蜂窝状铝箔失稳导致的。

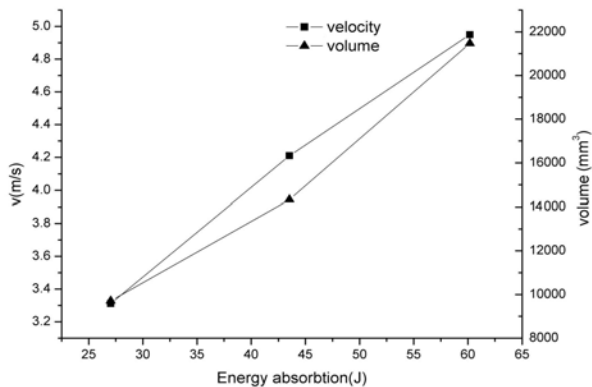


图 5 吸收能量、冲击速度和能量
吸收体积的关系图

Fig. 5 The relationship of the absorption energy, the impact velocity, and the absorption volume

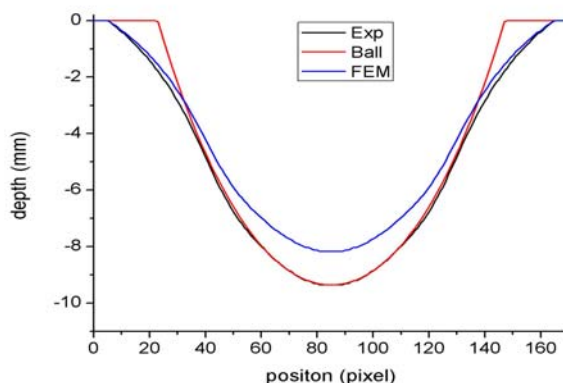


图 6 过凹坑中心的截面深度
曲线与球形截面的对比

Fig. 6 Shape curves of the cross section of the deformed honeycomb panel and the pendulum

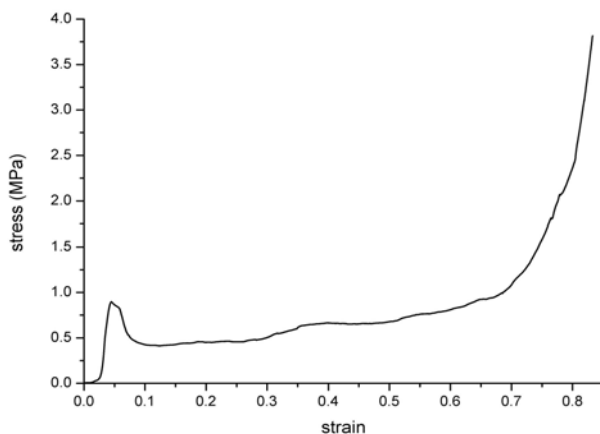


图 7 蜂窝铝压缩应力—应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curve of the honeycomb panel under the compressing test

2 数值模拟与分析

在实验的基础上,利用有限元数值模拟对蜂窝铝结构冲击吸能行为进一步分析,主要包括蜂窝结构中不同部分吸能占总能量的百分比及其在吸能中起到的作用,以及在时间历程上变形体积和吸收能量的关系等。

2.1 数值模型及可靠性验证

按照真实结构的尺寸和形状建立有限元模型,如图 8 所示。其中摆锤用离散刚体单元 R3D4 和 R3D3 组成球体,质量为 5kg;蜂窝铝结构采用 S4R 单元,其中铝芯用矩形单元,厚度为 0.05mm,蒙皮厚度为 0.8mm,划分为四边形单元,且由 110 个这样的四边形单元在蒙皮表面形成一个正六边形区域,对应着铝芯的一个真实胞元的端面,其中蒙皮单元和铝芯单元在接触处是共节点的。材料参数通过对真实蜂窝材料进行单向拉伸实验获得,如图 9。实验中摆锤和蜂窝铝板的表面皆为光滑且涂抹凡士林,所以接触表面的摩擦效应在计算中忽略不计。模型接触定义为法向协调主从接触,速度的法向分量在冲

击接触中连续,无黏附无阻尼。在计算中,定义摆锤的法向初始速度,蜂窝铝板背面固支。蜂窝铝虽为闭胞材料,在低速冲击下其气体压缩效应通常忽略不计。本文采用在胞元内部增加与位移成正比的法向反力的方式近似模拟压气效应。最后,由于摆锤的速度小于 10m/s ,其应变率效应被忽略。考虑到蜂窝铝轴向塑性坍塌不会导致蜂窝结构面内挤压且两面有铝蒙皮,因此整体结构的泊松比近似为零。

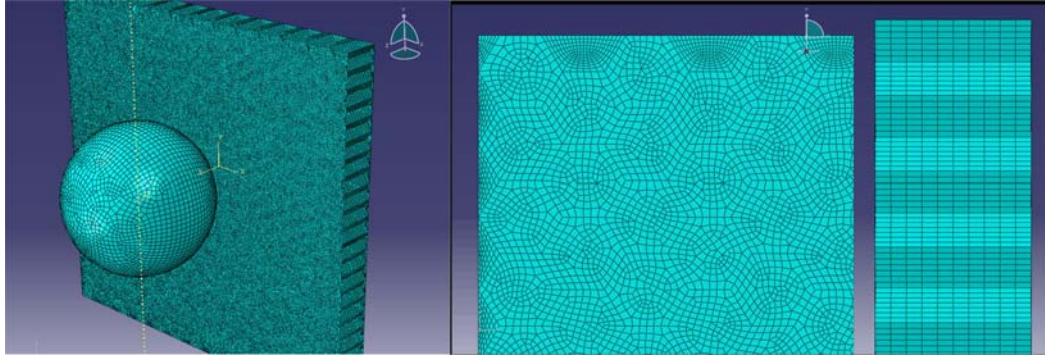


图8 有限元模型及蒙皮和铝芯胞元侧面的网格划分

Fig. 8 Finite element model and the meshing of the skin and the sandwich of the honeycomb structure

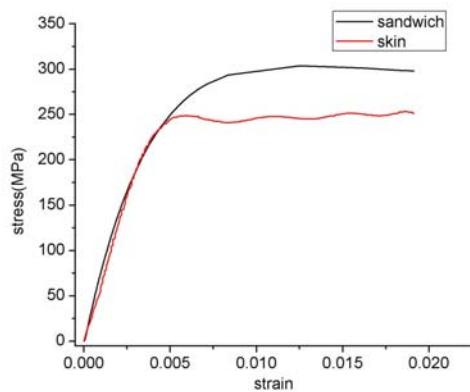


图9 蜂窝铝结构中蒙皮和铝芯材料的应力—应变曲线
Fig. 9 Stress-strain curves of the skin and the sandwich of the tested honeycomb structure

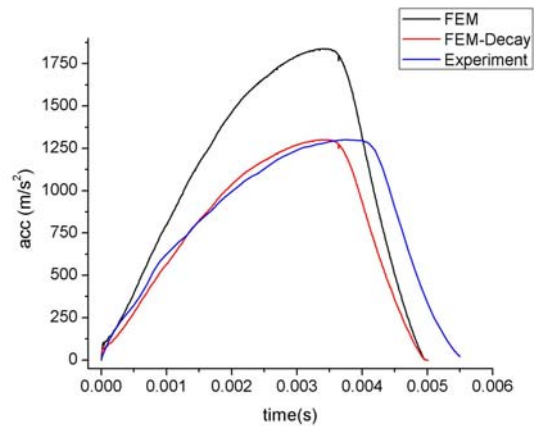


图10 模拟和实验获得的加速度曲线
Fig. 10 Accelerate curves obtained from the FEM, the modified FEM and the experiment

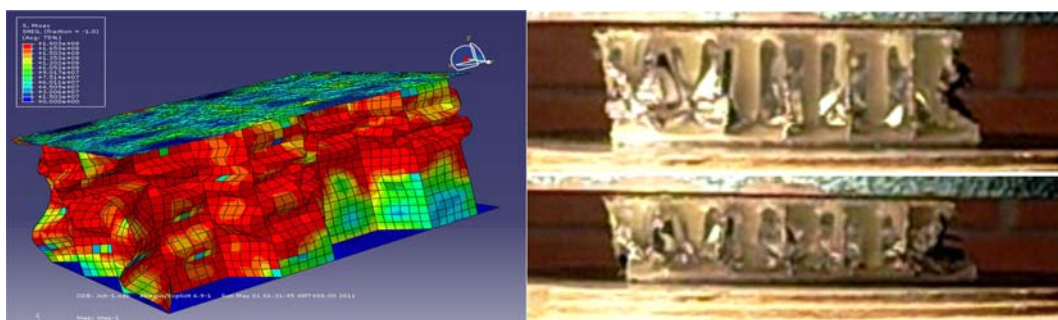


图11 蜂窝铝胞元变形的数值模拟和实验结果

Fig. 11 Deformation mechanism of the sandwich cells and the corresponding experimental results

为了验证有限元模型的可靠性,模拟计算得到的加速度曲线(图10)、表面变形(图6)和内部变形模式与真实实验的对比分别见图10、图6和图11。从图10的数值模拟结果看到,计算值要比实验值偏高,主要原因是实际结构与理想模型的差别。因为,蒙皮和蜂窝铝芯是由胶粘接的,冲击时胶粘结的强度可能不满足模型中理想的共结点假设,所以计算模型显得偏硬一些。事实上,如果将计算的加速度值整体乘以衰减因子 0.71 ,其结果和实验吻合的相当好。为了揭示蜂窝胞元的变形机制,通过模拟平头

压缩蜂窝板实验,获得如图 11 所示的蜂窝胞元变形的数值模拟结果。可以看到蜂窝铝胞元在轴向压缩下和实验测量结果类似,发生塑性坍塌,造成六边形蜂窝胞元的孔壁按一定波长沿轴向方向进行折叠,并在塑性铰处发生变形而成为能量耗散的主要因素。此处用平压实验进行比较,是因为对摆锤冲击引起的球形压缩很难保持压缩区铝芯胞元结构的损伤状态在切开时不受破坏。

2.2 吸能因素及不同结构对吸能特性的影响

蜂窝铝结构受到冲击而发生变形,由于内部铝箔表面光滑,较少发生接触,因此在冲击速度较低时不考虑摩擦耗散、热效应、气体压缩效应和撕裂等损伤耗散。实验中也验证了韧性良好的铝箔几乎很少发生断裂。因此吸能的主要因素是塑性耗散能和弹性应变能,这些能量都来自摆锤的动能。表 2 给出了蜂窝结构各部分在变形最大时刻和结束时刻能量吸收的份额和百分比。

表 2 能量吸收的份额和百分比

Tab. 2 Percentage of energy absorbed by sandwich cells and aluminum skins

模 型	时 刻	初 始	变 形 最 大		最 终	
	能量成分	能量(J)	能量(J)	百分比%	能量(J)	百分比%
整 体	动能	44.98	0	0	4.39	9.76%
	塑性耗散能	0	35.08	77.99%	36.37	80.86%
	应变能	0	9.77	21.71%	4.06	9.03%
蒙 皮	塑性耗散能	0	16.60	36.91%	16.60	36.91%
	应变能	0	5.80	12.89%	1.16	2.58%
铝 芯	塑性耗散能	0	18.48	41.08%	19.77	43.95%
	应变能	0	3.97	8.82%	2.90	6.45%

从表 2 中可见蜂窝铝结构在冲击中吸收了 90%左右的动能,吸能效果很好。其中蜂窝状铝芯比蒙皮吸收了更多的能量。能量吸收主要由塑形耗散能控制,可达总能量的 80%。弹性应变能在变形最大的时刻达到 20%,回弹结束后维持在不到 10%。剩余百分之十应是结构部分塑性变形阻止毗连部分回弹造成残余应力,所以仍有残余的应变能。图 12 显示了在实际试件参数的基础上分别调整蒙皮和胞元材料铝箔的厚度,得到的摆锤加速度峰值对比曲线。可见蒙皮和铝芯的厚度对吸能效果的影响都是较大的。在计算中发现,减小蒙皮厚度,结构总能量吸收变化不大,但蒙皮部分吸收的能量显著减少了。所以蒙皮除了自身变形吸能之外,更多的是起到带动铝箔胞元的变形。如果冲击能量加大,这一效应将更加明显。

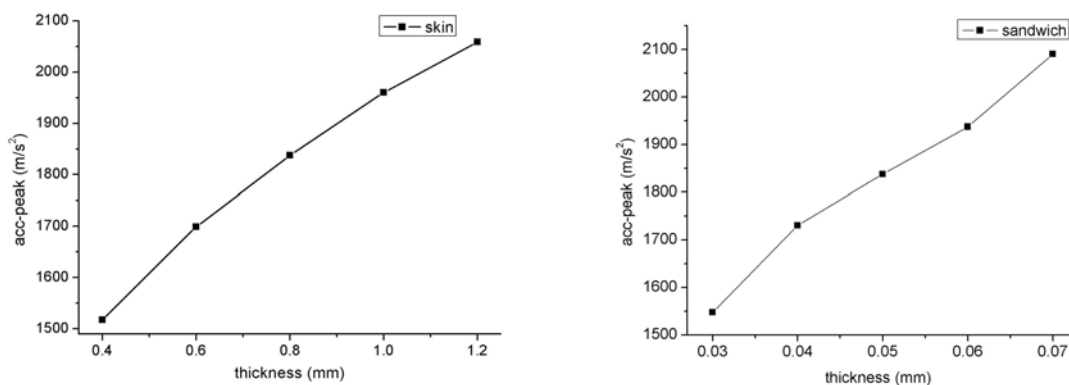


图 12 调整蒙皮和铝芯厚度的加速度峰值比较

Fig. 12 Peak values of accelerations with different thicknesses of aluminum skins and sandwich cells

2.3 能量吸收和变形体积的关系

由图7的蜂窝铝压缩应力—应变曲线可以看到,该蜂窝结构具有相当长的应力平台段,对于一维模型的轴向压缩,能量吸收应该和位移近似成正比。对于本文的球形加载,若能给出能量吸收和变形体积的关系,将对在工程中发展通过变形量直观估计吸能能力具有重要的应用价值。下面通过有限元数值计算,讨论在冲击变形时,不同时刻的变形体积和其吸收能量的关系。

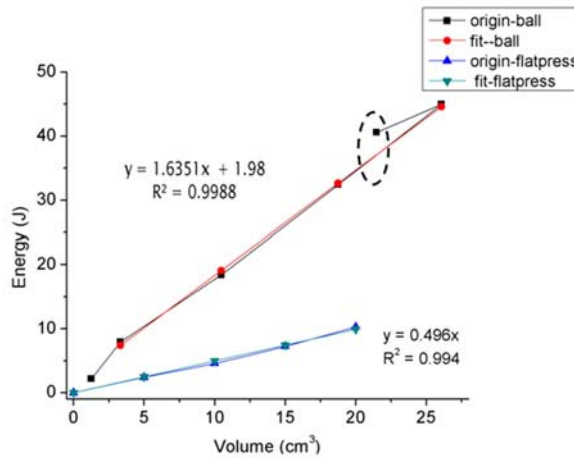


图13 吸收能量和变形体积的关系

Fig. 13 The relationship between the energy absorption and the deformation volume

由图13可见,对于球形冲击物加载的情况,计算所吸收的能量和变形体积在回弹前具有近似的线性关系,回弹后由于部分应变能没有释放,因此能量要比回弹前相同变形体积时对应的能量高,分别为40.58焦耳和37.07焦耳(图中标识区域)。拟合的能量—体积曲线斜率为1.64。为了和平压模式相比较,用同样的蜂窝结构计算得到的吸收能量和变形体积的关系也绘于图13中,可以看到能量吸收和变形体积也近似为线性关系。拟合该曲线获得的能量—体积曲线斜率约为0.50,事实上在一维情形下这一斜率近似对应着压缩应力应变曲线的平台应力,即:

$$\frac{W}{V} = \frac{\bar{\sigma} \cdot S \cdot \epsilon \cdot H}{S \cdot \epsilon \cdot H} = \bar{\sigma} \quad (1)$$

其中 S 表示压缩面积; H 为蜂窝板的厚度; ϵ 为应变变量; $\bar{\sigma}$ 为平台应力。

对于平压情形,在实验中测量获得的平台应力为0.55MPa左右,和公式(1)计算的结果较为一致。但是将这一数值和本文摆锤产生的球形冲击下获得的斜率相比差别较大,原因是球形撞击时蒙皮变形吸收了一定的能量,蒙皮和铝芯结合处的塑性弯曲也吸收了一定的能量,而且蒙皮变形导致内部铝芯的变形模式和平压也有所区别。但是球形冲击时依然可以用线性关系近似描述能量吸收和变形体积之间的关系。

2.4 平均压溃应力的估算

如前文所述,蜂窝铝在轴向压溃时,平台应力主要被塑形压溃所控制,通过对胞壁行为的研究可以得到简单的结果。利用 Wierzbicki 等人的研究结果,可以得到同时考虑了弯曲和拉伸变形时,正六边形蜂窝铝的平均压溃应力为^[1]:

$$\frac{\sigma_{ps}}{Y_s} = 5.6 \left(\frac{h}{l} \right)^{5/3} \quad (2)$$

其中 Y_s 是实体材料的屈服应力; h 为壁厚; l 为边长。这里的幂次考虑了弯曲和拉伸作用的联合效应。与此同时, Gibson 和 Ashby 也给出了一种只考虑胞壁塑形弯曲的平均压溃应力公式^[2]:

$$\frac{\sigma_{ps}}{Y_s} = 2 \left(\frac{h}{l} \right)^2 \quad (3)$$

将本文蜂窝铝结构的参数 $h=0.05\text{mm}$, $l=5.0\text{mm}$, $Y_s=185\text{MPa}$, 分别代入(2)式和(3)式,计算获得的平均压溃应力分别为0.48MPa和0.37MPa。实验中得到的压溃应力在应变小于0.4时在

0.42MPa 和 0.54MPa 之间,大于 0.4 时范围增加到 0.54MPa 至 0.7MPa。可见式(2)的计算结果更接近实验数据,说明本文使用的蜂窝铝在压溃变形时有较强的拉伸作用。

3 结 论

通过摆锤冲击实验和准静态轴向压缩实验,发现本文实验中所用的蜂窝铝结构具有良好的吸能能力,将输入的能量大部分转换成塑性变形能;摆锤的加速度峰值较低、冲击持续时间较长;结构吸能比较稳定。

引入结构光三维形貌测量系统可原位测量冲击变形后蜂窝铝板的三维变形,并和数值计算相结合,发现不同实验中变形体积和吸收的能量有近似线性关系。这一关系可以用于事故还原等实际应用,即根据碰撞现场遗留的变形,用形貌测量得到变形体积,进而估计冲击速度。

将测量的变形形貌与摆锤的球形形貌相比较,可以看到有蒙皮的蜂窝结构变形体积较大,说明蒙皮起到的连带效应可以增加结构的吸能能力。

通过有限元数值模拟,得到低速冲击中的能量吸收绝大部分是塑形耗散能。铝芯吸收能量相对更多,蒙皮除了吸收能量,更有带动内部变形的重要作用。利用数值模拟得到了同一实验中不同时刻蜂窝结构能量吸收和其变形体积的关系,发现其有近似线性关系,但斜率与一维平压模型有较大的差别,因为此时蒙皮在自身变形和连带变形中起了重要的作用。因此在相同厚度蜂窝铝板的情况下,合理设计蜂窝铝结构的蒙皮厚度和铝芯胞元壁厚,可以减小加速度峰值。

参考文献:

- [1] 余同希,卢国兴. 材料与结构的能量吸收[M]. 化学工业出版社, 2006 (YU Tongxi, LU Guoxing. Energy absorption of structures and materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006(in Chinese))
- [2] Lorna J Gibson, Michael F Ashby, 刘培生. 多孔固体结构与性能[M]. 清华大学出版社, 2003 (Lorna J Gibson, Michael F Ashby, Liu Peisheng. Cellular solids: structure and properties[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003(in Chinese))
- [3] 李斌潮,赵桂平,卢天健. 高孔隙率闭孔泡沫铝的低应变率压缩行为[J]. 力学学报, 2011, 3(1):122—135 (Li Bingchao, Zhao Guiping, Lu Tianjian. Low strain rate compressive behavior of high porosity closed-cell aluminum foams[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 3(1):122—135(in Chinese))
- [4] Shi G Y, Tong P. Equivalent transverse shear stiffness of honeycomb cores[J]. International Journal of Solids and Structures, 1995, 32:1383—1393.
- [5] Foo C C, Seah L K, Chai G B. Low-velocity impact failure of aluminum honeycomb sandwich panels[J]. Composite structures, 2008, 85:20—28.
- [6] Chung Kim Yuen S, Nurick G N. The Crushing Characteristics of Square Tubes With Blast-Induced Imperfections—Part I[J]. Experiments Journal of Applied Mechanics, 2009, 76/051308-1.
- [7] 王塞北,孙勇,彭明军. 基于 FEA 的蜂窝铝芯平压分析[J]. 材料导报, 2010, 24(10):74—76 (Wang Saibei, Sun Yong, Peng Mingjun. Analysis of Deformation of Aluminum Honeycomb Core Based on FEM[J]. Materials Review, 2010, 24(10):74—76 (in Chinese))
- [8] Ruan D, Lu G, Wang B, et al. In-plane dynamic crushing of honeycombs—a finite element study[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28:161—182.
- [9] Peter J Schuster. Current Trends in Bumper Design for Pedestrian Impact[J]. SAE, 2006-01-0464.
- [10] 彭瑾,王黎,高晓蓉等. Fourier 变换轮廓术中参数的选择和优化研究[J]. 现代电子技术, 2009, 32(2): 98—101(Peng Jin, Wang Li, Gao Xiaorong, et al. Study on Optimization of Parameter Selection in Fourier Transform Profilometry[J]. Modern Electronics Technique, 2009, 32(2): 98—101(in Chinese))
- [11] 潘伟,赵毅,阮雪榆. 相移法在光栅投影测量中的应用[J]. 应用光学, 2003, 24(4):46—49 (PAN Wei, ZHAO Yi, RUAN Xueyu. Application of phase shifting method in projection grating measurement[J]. Journal of Applied Optics, 2003, 24(4):46—49 (in Chinese))

On the Surface Deformation Measurement and Energy Absorption of a Honeycomb Panel Subjected to Low-Velocity Impact

WANG Gang, LI Xi-de

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Aluminium honeycomb structure is widely used in engineering due to its both physical and mechanical excellence. Thus, understanding its mechanical properties has become an increasingly important issue. The study of dynamic compression performance and energy absorption characteristics of aluminium honeycomb structure subjected to low-velocity impact was carried out based on pendulum impact test. Results show that the aluminium honeycomb structure has good impact energy absorbing characteristics, and its deformation behaviour is similar to quasi-static deformation under spherical pendulum impact. High-speed video camera and an acceleration sensor were used to record the acceleration attenuation of pendulum during experiments. A projection profile system was employed to obtain in situ three-dimensional topography of aluminium honeycomb structure subjected to impact deformation. Finally, the internal damage which is not observed in experiment was further analyzed by using finite element method, and the effect of honeycomb parameter on energy absorption was also discussed in detailed.

Keywords: honeycomb aluminium; axial impact; energy absorption; three-dimensional shape measurement