

文章编号: 1000-4750(2014)07-0245-05

# 软硬交错金属空心球泡沫动力学性能研究

吴鹤翔, 刘 颖, 祝 瑛

(北京交通大学土建学院力学系, 北京 100044)

**摘 要:** 通过控制点阵结构中不同阵点位置空心球的软硬程度建立了交错金属空心球泡沫模型。在此基础上, 对比研究了不同冲击条件下, 均匀和各种交错金属空心球泡沫的动力学响应特性。重点分析了软硬空心球排布方式对金属空心球泡沫动力学性能的影响。研究表明, 通过对软硬空心球排布方式的控制, 材料可以在一定范围内根据外载条件进行自主调节, 以控制金属空心球泡沫内的应力分布, 提高了金属空心球泡沫的能量吸收效率。软硬交错空心球模型的建立为实现金属空心球泡沫的自适应设计提供了新的思路。

**关键词:** 金属空心球泡沫; 点阵结构; 软硬空心球分布; 冲击; LS-DYNA

中图分类号: TB301 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.01.0029

## DYNAMIC PERFORMANCE OF 3D METAL-HOLLOW-SPHERE FOAMS WITH SOFT-HARD SPHERES

WU He-xiang, LIU Ying, ZHU Ying

(Department of Mechanics, School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** 3D interleaved metal hollow sphere foams are established by controlling the stiffness of hollow spheres at different lattice points. The dynamic performances of uniform metal hollow sphere foams and mixed ones are investigated comparatively under different impact conditions. The emphasis is placed on the effects of the distribution pattern of soft and hard hollow spheres on the dynamic foam performance. The results show that by controlling the distribution of soft and hard hollow spheres, the stresses in the materials can adjust autonomously according to the impact condition, which results in an enhanced energy absorption efficiency. The 3D soft-hard sphere mixed metal-hollow-sphere foam provides some useful guidance in the adaptive design of metal-hollow-sphere foams.

**Key words:** metal hollow sphere foams; lattice structure; soft and hard hollow sphere distribution; impact; LS-DYNA

作为一种理想的能量吸收材料, 多孔材料在航空航天等工程领域的冲击防护结构设计中得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。其中, 金属空心球泡沫(metal hollow sphere foam)凭借高能量/质量吸收比和内部结构均匀等优良特性受到了广泛关注<sup>[4-5]</sup>。随着MHSF在关键性领域地深入应用, 一些关键性问题, 例如, 如何实现冲击过程中材料内的应力分布及能量吸收过程的自主调控等, 成为金属空心球泡沫动

力学性能设计过程中的新课题之一。

Yu 及其合作者对 2 维和 3 维均匀空心球结构的静态及动态性能进行了研究<sup>[6-8]</sup>。Gupta 给出了一种功能梯度空心球泡沫模型, 使泡沫材料的能量吸收能力得到了有效的提高<sup>[9]</sup>。Liu 等基于一维应力波理论, 采用数值分析的方法给出了梯度金属空心球泡沫和均匀金属空心球泡沫动力学响应之间的关系<sup>[10]</sup>。另外, 一些学者也提出了自适应能量吸收材

收稿日期: 2013-01-11; 修改日期: 2013-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272046); 教育部新世纪人才资助计划项目(NCET)

通讯作者: 刘 颖(1973-), 女, 山东人, 教授, 博士, 博导, 主要从事冲击动力学方面的研究(E-mail: yliu5@bjtu.edu.cn).

作者简介: 吴鹤翔(1983-), 男, 黑龙江人, 博士生, 主要从事冲击动力学方面的研究(E-mail: wuhexiang2002@163.com);

祝 瑛(1964-), 女, 浙江人, 副教授, 学士, 主要从事弹性波动理论方面的研究(E-mail: yzhu1@bjtu.edu.cn).

料的概念<sup>[11]</sup>。但是，由于冲击载荷的作用时间往往较短，如何解决自适应响应时间和冲击载荷作用时间的差距成为自适应材料设计中的难点之一。

为了避免由于响应时间不同而引起的矛盾，作者提出不通过引入控制元件或单纯使用智能材料来实现对结构的冲击自适应控制，而是通过合理地控制质量在空间的分布以及不同材料的组合应用来控制材料及结构内的应力分布和能量吸收过程。基于此思想，本文建立了一种软硬交错空心球排布 MHSF 模型。通过控制点阵结构中阵点位置空心球的软硬程度来控制 MHSF 的响应过程，以期金属空心球泡沫材料的自适应响应设计提供新的思路。

### 1 计算模型

金属空心球泡沫的计算模型如图 1 所示。泡沫材料试件由正方体胞元组成。试件的尺寸为  $L_x L_y L_z = n_x l \cdot n_y l \cdot n_z l$ ，其中  $L_x$ 、 $L_y$  和  $L_z$  分别表示试件沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的长度， $n_x$ 、 $n_y$ 、 $n_z$  分别表示沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向胞元的数量， $l$  表示胞元的边长。为了消除尺寸效应<sup>[12]</sup>，取  $n_x=6$ ， $n_y=9$ ， $n_z=6$ ， $l=40\text{mm}$ 。胞元内空心球的空间排布方式如图 2 所示，分别采用简单立方排布、体心立方排布和面心立方排布方式。空心球的外径分别为  $R_s=20\text{mm}$ ， $R_b=17.32\text{mm}$ ， $R_f=14.14\text{mm}$ ，其中下标  $s$ 、 $b$ 、 $f$  分别表示简单立方结构、体心立方结构和面心立方结构。空心球的软硬程度通过改变空心球的壁厚来进行控制(计算模型中胞元的大小、沿各方向胞元的数量、组成胞元的空心球的半径和厚度均可以根据实际工程中的需要进行设计)。此时，金属空心球泡沫的相对密度为：

$$\Delta r_k = \frac{r_k}{r^*} = \frac{4\pi}{3} \sum_{i=1}^N h_i \frac{3R_k^2 + h_i^2 - 3R_k h_i}{3l^3 n_x n_y n_z} \quad (1)$$

其中， $r_k$  表示泡沫的密度 ( $k = s, b, f$ )； $r^*$  是基体材料密度； $N$  是空心球的数量； $h_i$  是第  $i$  个空心球的厚度。

软硬度球的比例及种类对于 MHSF 的动力学响应均有影响。本文仅给出了软硬空心球比例为 1 : 1，而且只有两种空心球的情况。图 2 给出了不同点阵结构中空心球的排布方式。图中浅灰色的球表示软球，黑色的球表示硬球。SCU、BCCU、FCCU 表示简单立方排布、体心立方排布、面心立方排布均匀金属空心球泡沫；SCI1、SCI2、SCI3、SCI4、BCCII、FCCI1、FCCI2 表示交错金属空心球泡沫。

根据方程式(1)，不同排布金属空心球泡沫的几何参数和对应的相对密度如表 1 所示，其中  $h_H$  和  $h_L$  分别表示高密度分布和低密度分布金属空心球的壁厚。

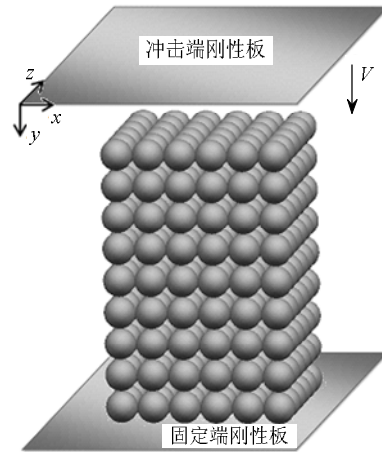


图 1 冲击载荷作用下空心球泡沫的计算模型

Fig.1 Calculating model of MHSF

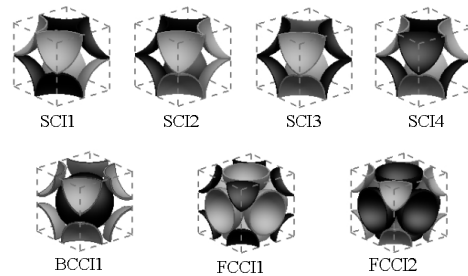


图 2 空心球空间排布胞元示意图

Fig.2 Represent Cells of MHSF

表 1 不同排布金属空心球泡沫的几何参数  
Table 1 Parameters for MHSF with different profile

	$h_H/\text{mm}$	$h_L/\text{mm}$	$R/\text{mm}$	$l/\text{mm}$	$\Delta\rho$
SCU	0.8	0.8	20		
SCII	1	0.6	20		
SCI2	1	0.6	20		
SCI3	1	0.6	20		
SCI4	1	0.6	20		
BCCU	0.53	0.53	17.32	40	0.0604
BCCII	0.66	0.4	17.32		
FCCU	0.4	0.4	14.14		
FCCI1	0.44	0.28	14.14		
FCCI2	0.56	0.34	14.14		

基于图 1 和图 2 给出的计算模型，本文采用非线性显示动力学有限元软件 LS-DYNA 对其在冲击载荷作用下的动力学响应特性进行了研究<sup>[13]</sup>。如图 1 所示，泡沫材料置于底部固定刚性板之上，四周无约束。顶部刚性板沿着  $y$  方向以某一初始速度运动。空心球的基体材料为铝，采用理想弹塑性模型。材料参数为：密度  $\rho=2700\text{kg/m}^3$ ，弹性模量  $E=$

69GPa, 屈服应力  $\sigma_{ys}=76\text{MPa}$ , 泊松比  $\nu=0.3$ 。计算中选用 Shell163 单元(四边形壳单元)对模型进行离散, 沿着壳的厚度方向定义 5 个积分点并采用全积分以保证计算精度和收敛性的要求。数值模拟过程中所有可能接触的表面均定义为单面自动接触并且不考虑摩擦的影响。另外, 不计空心球内空气的影响。

为了考察数值模拟结果的准确度, 根据文献[6]中的参数计算了两个球的挤压变形过程。如图 3 所示, 数值模拟结果和文献中给出的实验数据保持了良好的一致性(图中  $\delta$  表示标准化位移,  $P$  表示外荷载,  $M_0$  表示单位长度的塑性极限弯矩)。

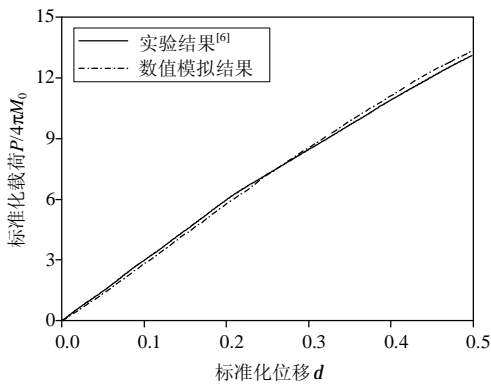


图 3 两球碰撞的数值模拟结果和实验结果的对比  
Fig.3 The comparison of the numerical and experimental results for the crushing of two spheres

## 2 结果和讨论

### 2.1 软硬空心球排布对金属空心球泡沫变形模式的影响

图 4 和图 5 分别给出了不同冲击速度作用下, SCU 和 SCII 金属空心球泡沫  $xoy$  截面内空心球的变形模式和局部变形图。此时, 金属空心球泡沫的相对压缩量为 0.15。如图所示, 对于 SCU 金属空心球泡沫, 在低速冲击条件下, 泡沫整体发生变形; 在高速冲击条件下, 变形从冲击端启动, 逐层压缩至固定端。对于 SCII 金属空心球泡沫, 在低速冲击下, 软空心球先发生变形至塑性坍塌, 硬空心球在软空心球完全压缩后才开始发生变形, 泡沫材料因软硬空心球的交错排布发生区域性分步变形模式; 在高速冲击条件下, 泡沫发生冲击波式压缩变形, 但是由于软硬空心球的交错排布, 冲击端附近仍然表现出分步启动的变形特征。其他点阵结构排布方式中软硬空心球的排布对金属空心球泡沫变形模式的影响有着相似的结果。

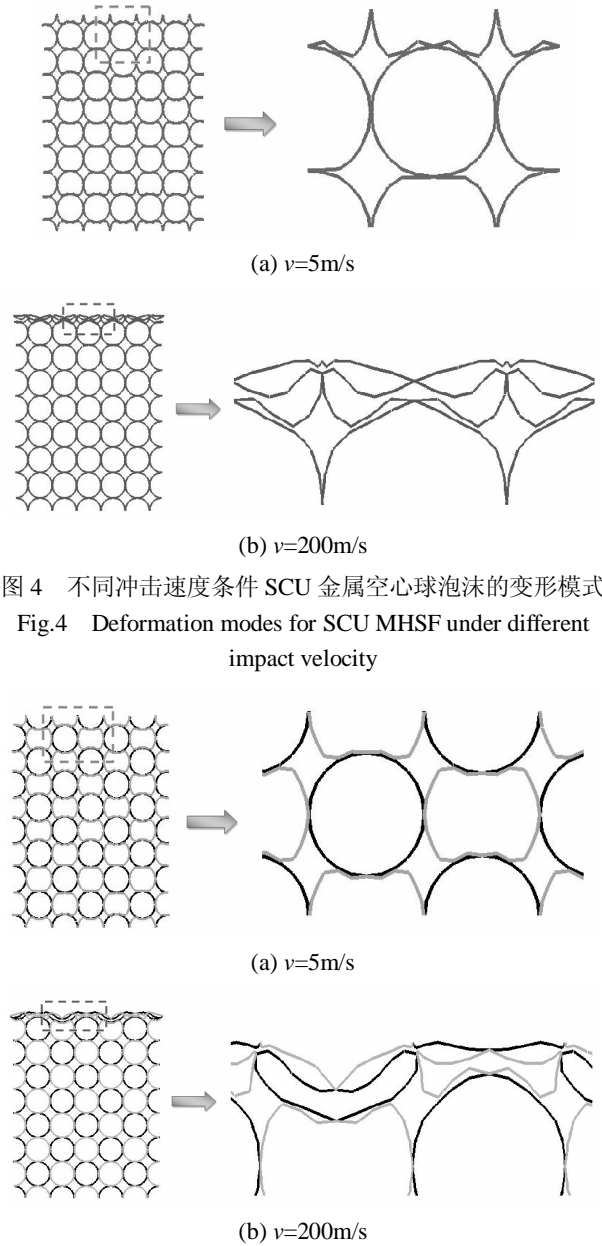


图 4 不同冲击速度条件 SCU 金属空心球泡沫的变形模式  
Fig.4 Deformation modes for SCU MHSF under different impact velocity

图 5 不同冲击速度条件 SCII 金属空心球泡沫的变形模式  
Fig.5 Deformation modes for SCII MHSF under different impact velocity

### 2.2 软硬空心球排布对金属空心球泡沫比吸能的影响

在能量吸收装置的性能评价指标中, 比吸能 (SEA, specific energy absorption), 即单位质量的能量吸收率, 是最重要的一个评价指标。其定义为<sup>[4]</sup>:

$$SEC = W_m = \frac{\int F d \delta}{m} = \frac{\int_0^{\delta} s(e) de}{r^*} \quad (2)$$

其中:  $F$  为作用力;  $\delta$  为冲击端的位移;  $m$  为多孔材料的质量。

图 6 给出了低速冲击条件下, 具有相同相对密度的简单立方排布、体心立方排布、面心立方排布均匀金属空心球泡沫和交错金属空心球泡沫的比吸能曲线。

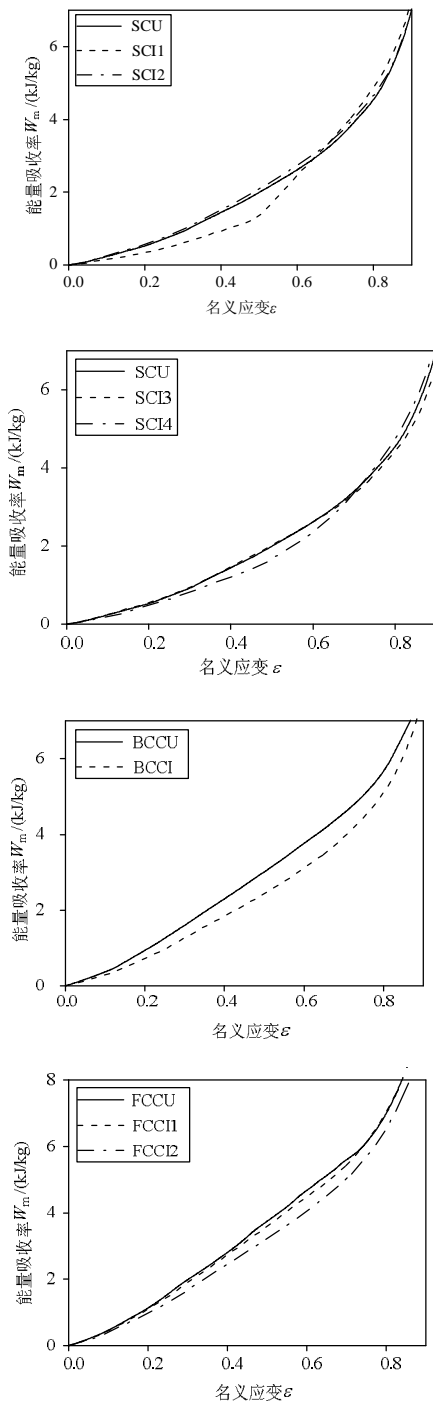


图 6 低速冲击条件下金属空心球泡沫比吸能曲线( $v=5\text{m/s}$ )  
Fig.6 Specific energy absorption of MHSF under low impact velocity ( $v=5\text{m/s}$ )

如图所示, 阵点位置上软硬空心球的分布是影响能量吸收过程的因素之一。低速冲击条件下, 达到同一压缩应变时, 同均匀金属空心球泡沫相比,

交错金属空心球泡沫的比吸能较低。但在简单立方排布金属空心球泡沫中, 当沿着冲击方向, 软硬空心球不存在交错排布时, 交错金属空心球泡沫的比吸能略高于均匀金属空心球泡沫。

### 2.3 软硬空心球排布对金属空心球泡沫压缩力效率的影响

在能量吸收装置的性能评价指标中, 压缩力效率(CFE, crush force efficiency)是另一个常用的评价指标。其定义为平均载荷与峰值载荷之比。在高速冲击条件下反映在冲击压缩过程中, 名义应力值震荡幅度的大小。名义应力值震荡幅度越小, 材料的压缩力效率越高。

图 7 给出了高速冲击条件下, 具有相同相对密度的简单立方排布、体心立方排布、面心立方排布均匀金属空心球泡沫和交错金属空心球泡沫冲击端的名义应力-应变关系曲线。如图所示, 高速冲击条件下, 金属空心球泡沫的名义应力发生震荡。震荡以平衡位置为起始点, 经历一个波峰和一个波谷, 最后回到平衡位置为终止点计为一个震荡周期。在冲击压缩过程中, 简单立方均匀金属空心球泡沫的名义应力经历了 9 个震荡周期, 体心立方和面心立方均匀金属空心球泡沫的名义应力经历了 18 个震荡周期。这是由于胞元内空心球的空间排布方式不同。简单立方排布胞元中, 空心球只占有胞元角点的位置, 所以沿着冲击压缩方向, 应力震荡周期的数量等于胞元的数量。体心立方和面心立方排布胞元中, 空心球同时占有胞元角点的位置和几何形心的位置, 所以沿着冲击压缩方向, 应力震荡周期的数量是胞元数量的 2 倍。

从图 7 还可以看出, 金属空心球泡沫的压缩力效率同时受点阵结构和阵点位置上软硬空心球分布的影响。不同的点阵结构排布方式, 应力分布不同, 体心立方排布的均匀金属空心球泡沫对应于震荡幅度较低的应力值, 具有较好的压缩力效率。此外, 阵点位置上软硬空心球分布也是影响金属空心球泡沫材料压缩力效率的重要因素。高速冲击条件下, 简单立方排布和面心立方排布金属空心球泡沫, 通过对软硬空心球排布方式的控制, 可以有效的提高泡沫的压缩力效率。其中, 对于简单立方排布结构, 只有沿着冲击方向将软硬空心球交错排布才能够有效的提高泡沫的压缩力效率。体心立方排布金属空心球泡沫, 采用均匀空心球, 泡沫具有更好的压缩率效率。

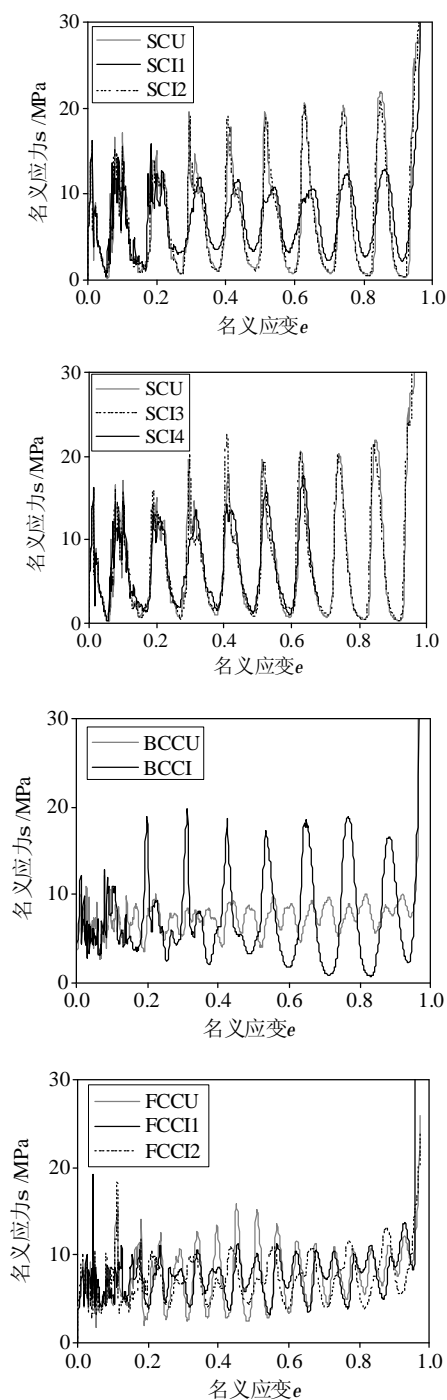


图7 高速冲击条件下均匀金属空心球泡沫和错排金属空心球泡沫冲击端的名义应力-应变关系曲线( $v=200\text{m/s}$ )

Fig.7 Nominal stress-strain curves of uniform MHSF and cross MHSF under high impact velocity ( $v=200\text{m/s}$ )

### 3 结论

本文建立了软硬交错空心球泡沫模型,以期通过对质量在空间的排布以及不同材料的组合使用来实现空心球泡沫对外加载荷的自适应调控。研究表明:通过阵点位置上软硬空心球的使用,可以控制材料的响应过程,以及材料内的应力分布和

能量吸收过程。本文仅仅对这个问题进行了初步的探讨。事实上,软硬空心球的排布位置,组占比,以及空心球基体材料的选择都会对材料的响应产生影响。如何实现不同因素间的最优配置还有待于进一步的深入探讨。

### 参考文献:

- [1] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: Structure and properties [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [2] Lu G X, Yu T X. Energy Absorption of structures and materials [M]. Cambridge: CRC Press, Woodhead Publishing Limited, 2003.
- [3] 潘艺, 胡时胜, 凤仪, 朱震刚. 泡孔尺寸对开孔泡沫铝合金力学性能的影响[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 171—175.  
Pan Yi, Hu Shisheng, Feng Yi, Zhu Zhengang. Cell-size effect on mechanical property of open-cell aluminum alloy foam [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(4): 171—175. (in Chinese)
- [4] 余为, 辛美娟, 李慧剑, 梁希. 薄壁金属空心球结构压缩力学性能研究[J]. 实验力学, 2012, 27(3): 377—384.  
Yu Wei, Xin Meijuan, Li Huijian, Liang Xi. Study of mechanical properties of thin-walled MHSF under compression [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(3): 377—384. (in Chinese)
- [5] 吴鹤翔, 刘颖, 张新春, 杨帅. 点阵结构对具有密度梯度的三维空心球泡沫冲击性能的影响[J]. 工程力学, 2011, 28(12): 213—220.  
Wu Hexiang, Liu Ying, Zhang Xinchun, Yang Shuai. The influence of lattice structures on the dynamic performance of 3D metal hollow sphere foams with density gradient [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(12): 213—220. (in Chinese)
- [6] Ruan H H, Gao Z Y, Yu T X. Crushing of thin-walled spheres and sphere arrays [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2006, 48: 117—133.
- [7] Karagiozova D, Yu T X, Gao Z Y. Modelling of MHS cellular solid in large strains [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2006, 48: 1273—1286.
- [8] Dong X L, Gao Z Y, Yu T X. Dynamic crushing of thin-walled spheres: An experimental study [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35: 717—726.
- [9] Gupta N. A functionally graded syntactic foam material for high energy absorption under compression [J]. Material Letters, 2007, 61: 979—982.
- [10] Liu Y, Wu H X, Wang B. Gradient design of metal hollow sphere (MHS) foams with density gradients [J]. Composites: Part B, 2012, 43: 1346—1352.
- [11] Zhang X W. Conceptual study of adaptive energy absorbers [D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2009.
- [12] Gibson L G. Mechanical behaviour of metallic foams [J]. Annual Reviews of Materials Science, 2000, 30: 191—227.
- [13] LSTC. LS-DYNA keyword user's manual [Z]. Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [14] Kooistra G W, Deshpande V S, Wadley H N G. Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structures made from aluminum [J]. Acta Materialia, 2004, 52: 4229—4237.