

# 多孔金属介质的力学性能及其参数依赖性研究

Mechanical Properties of Porous Metal Materials  
and Their Dependence on Geometric Parameters

张晓伟,王彦莉,陈利,张庆明

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

ZHANG Xiao-wei, WANG Yan-li, CHEN Li, ZHANG Qing-ming

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**摘要:** 采用万能材料试验机(MTS)和扫描电子显微镜(SEM)对几种典型多孔泡沫铜的准静态力学特性及其微观特征进行研究。结果表明,材料的压缩过程为典型的三阶段形式:弹性段、平台段和密实段;其力学性能不但依赖相对密度,而且受平均孔径的影响。材料力学性能的孔径依赖性主要是由其结构的各向异性所致。

**关键词:** 多孔金属;相对密度;平台应力;能量吸收

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-4381.2014.02.011

**中图分类号:** TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2014)02-0055-05

**Abstract:** By means of material testing systems (MTS) and scanning electron microscope (SEM), the mechanical properties and microstructural characteristics of several porous copper foams were investigated. The results show that the compression behavior of these materials presents three typical stages, which are elastic stage, plateau stage and densification stage. Their mechanical properties depend on not only the relative density but also the pore size. Meanwhile, the dependence of mechanical properties on the pore size is mainly due to the structural anisotropy.

**Key words:** porous metal; relative density; plateau stress; energy absorption

多孔材料具有超轻的相对密度、优良的抗冲击和爆炸性能,被广泛应用于航空与防护结构中。如泡沫铝、泡沫铜、金属空心球材料、微型金属丝/网结构以及纳米多孔材料等。这些材料的工程应用推动了人们对金属多孔材料力学行为的研究兴趣<sup>[1]</sup>。

泡沫材料的力学性能主要依赖于基体力学性能、相对密度及表征材料内部几何结构的参数等。许多研究者从这些方面入手,以理论、实验或数值模拟的方法研究了泡沫金属材料的力学性能。如 Gibson 和 Ashby<sup>[2]</sup>利用立方体交错模型对不同种类泡沫材料的压缩变形机制进行简单解释,给出了宏观力学性能的半经验公式。Vander Burg 等<sup>[3]</sup>, Zhu 等<sup>[4]</sup>用 Voronoi 模型模拟泡沫材料的微结构,研究了材料的弹性模量和压缩性能。Warren 和 Kraynik<sup>[5]</sup>利用支柱型四面体微结构模型建立了开孔泡沫材料的弹性非线性本构关系,但它只适用于泡沫材料因支柱屈曲而导致屈服变形前的单轴变形行为。Nieh 等<sup>[6]</sup>研究了泡孔尺寸对材料屈服强度和弹性模量的影响,并认为这种影响可

以忽略。Onck 等<sup>[7]</sup>利用数值模拟对泡沫材料进行分析,认为开孔尺寸对泡沫材料力学性能是有影响的。国内学者也在这方面作了众多研究,如卢子兴等<sup>[8]</sup>、赵隆茂等<sup>[9]</sup>、胡时胜等<sup>[10]</sup>通过理论和实验研究了泡沫材料相对密度对材料整体力学性能的影响,刘培生等<sup>[11]</sup>总结了近年来用于多孔材料的分析模型,曹晓卿等<sup>[12]</sup>从理论和计算两方面探讨了微结构对多孔材料力学性能的影响。

纵观整个研究领域,对开孔泡沫金属力学行为的研究,理论方面主要通过对典型胞元结构进行分析,采用简化模型和有限元模拟方法来得到泡沫材料的力学行为;而在实验方面,采用准静态或动态冲击实验。绝大多数的研究表明,相对密度对材料的力学行为起主导作用。但是,在孔隙尺寸对其力学性能影响方面的研究报道相对较少。本工作以国内市场上典型的多孔泡沫铜产品为对象,通过静压实验对多孔金属介质的力学行为进行研究,得到了材料力学性能与相对密度、孔隙尺寸等材料参数之间的相依关系。在此基础上,

重点分析了孔隙尺寸对材料性能的影响机理。

1 实验

实验材料为开孔泡沫铜,由上海某新型材料生产商提供,其采用电解沉积工艺制成<sup>[13]</sup>。在生产过程中,阴极镀件是聚氨酯制成的开孔基体,电解过程利用电子流的作用,使电解液中金属阳离子还原成金属单质而沉积在阴极镀件表面。当还原的金属铜沉积量达到要求时停止电镀,然后在熔炉里对电镀好的材料进行热处理,烧掉基体,从而得到了开孔泡沫铜。因此,泡沫铜孔径的大小取决于聚氨酯泡沫基体孔径的大小,而相

对密度可由电镀时间加以控制。网状的聚氨酯泡沫孔大小可以做到 5ppi 到 130ppi,其中 ppi 指每 25.4mm 范围内的平均孔洞数量。利用同一种聚氨酯泡沫基体可以制得相同孔径但相对密度不同的泡沫金属材料。

本实验采用三种不同平均孔径的多孔泡沫铜,其 ppi 参数分别为 40,70 和 100。由于材料为 10mm 厚的板料,通过电火花线切割方法将材料制成 20mm×20mm×10mm 尺寸的方形试件。图 1 分别为 40ppi 和 70ppi 的泡沫铜面内 SEM 显微照片,可以看出材料的孔洞基本处于连通状态,但其孔径大小呈概率分布。经过初步测量,每英寸的平均孔洞数量和供应商提供的参数基本一致。

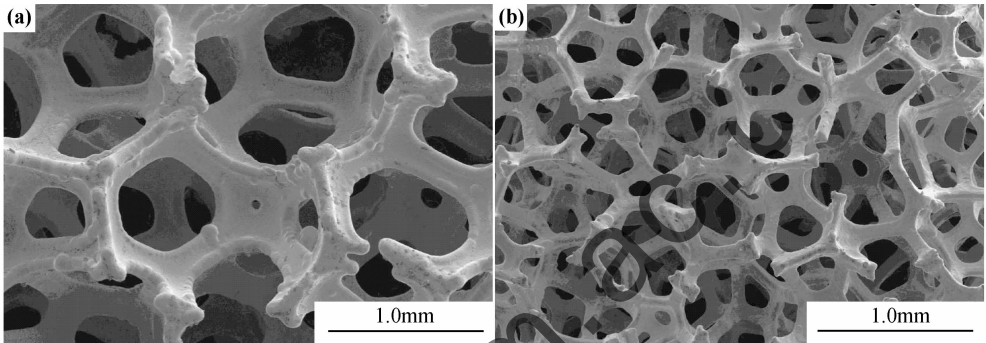


图 1 多孔泡沫铜的 SEM 形态 (a)40ppi;(b)70ppi  
Fig.1 Microstructure of porous copper foams (a)40ppi;(b)70ppi

准静态压缩实验在多功能材料实验机(MTS)上进行,实验时将两块试件叠在一起进行压缩,则试件厚度为 20mm。加载速率为 5mm/min,名义加载应变率约 0.0042s<sup>-1</sup>。由于材料的相对密度在板内有一定的分散性,按照 ppi 不同将其分为三组进行实验,所对应

的试件分组编号分别为 A, B 和 C,每组选出 11 个不同相对密度的试件。由于基体材料的密度  $\rho_s = 8.9\text{g/cm}^3$ ,通过测量试件的尺寸和质量得到各个试件的名义密度  $\rho$ 。试件的相对密度如表 1 所示,ppi 为 40 和 70 的材料,其相对密度均在 0.06~0.085 之间,而 ppi

表 1 多孔材料试件的相对密度  
Table 1 Relative density of the specimens

No	Pore density/ppi	$\rho/\rho_s$
A <sub>1</sub> -A <sub>11</sub>	40	0.0613,0.0639,0.0668,0.0693,0.0704,0.0728,0.0736,0.0768,0.0781,0.0819,0.0840
B <sub>1</sub> -B <sub>11</sub>	70	0.0586,0.0621,0.0632,0.0651,0.0673,0.0705,0.0714,0.0729,0.0756,0.0791,0.0852
C <sub>1</sub> -C <sub>11</sub>	100	0.0754,0.0775,0.0791,0.0817,0.0843,0.0872,0.0884,0.0909,0.0935,0.0964,0.0981

为 100 的相对密度则在 0.075~0.1 之间。

2 实验结果与讨论

2.1 准静态压缩下材料的应力-应变行为

图 2(a)和图 2(b)分别给出了 ppi 为 40 和 100 材料的五条典型压缩应力-应变曲线,并给出了每条曲线对应的试件编号和相对密度。由图 2 可以看出,其压缩应力-应变曲线符合典型泡沫材料压缩应力-应变曲线的特征,即表现为明显的 3 个阶段-线弹性变形阶

段、塑性屈服平台阶段和密实化阶段。首先,材料经历短暂的线弹性压缩,达到屈服后进入平台段,此时应力不再增长或者增长缓慢。直到应变超过一定值之后,材料被压至密实。此外,随着相对密度的增加,材料的弹性模量和平台应力都有显著提高。

为进一步得出材料参数影响规律,开孔泡沫铜的弹性模量  $E$  取加载曲线初始线性段的斜率,平台应力  $\sigma_{pi}$  定义为从应力-应变曲线进入平台段的第一个点到应变达到 50%时所对应的点之间曲线段的应力平均值。由于密实应变的定义目前还没有一个统一标准,

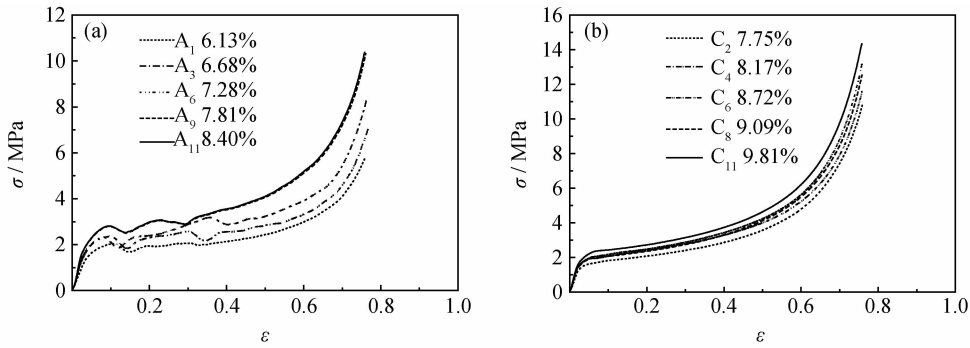


图2 不同相对密度泡沫铜应力-应变曲线 (a)40ppi;(b)100ppi

Fig. 2 Quasi-static compression stress-strain curves at different relative densities (a)40ppi;(b)100ppi

为研究方便取 50% 应变处的应力值为  $\sigma_{0.5}$ ，而将  $1.5\sigma_{0.5}$  应力值所对应的应变定义为密实应变  $\epsilon_D$ 。根据应力-应变曲线求出各个试件的弹性模量、平台应力及密实应变等力学参数。

## 2.2 材料参数对其力学性能的影响

### 2.2.1 相对密度对弹性模量和平台应力的影响

实验用开孔泡沫铜材料的基体材料为纯铜，其弹

性模量为  $E_s = 115\text{GPa}$ ，屈服应力  $\sigma_{ys} = 200\text{MPa}$ 。实验得出了 3 种孔隙度材料的相对弹性模量  $E/E_s$  和相对平台应力  $\sigma_{pl}/\sigma_{ys}$  随相对密度  $\rho/\rho_s$  的变化关系，如图 3 所示。图 3 还给出了每种孔隙度材料的弹性模量和平台应力的幂函数拟合，其变化规律与文献[2]给出结论基本符合。

由图 3 可以看出，对同种孔隙参数的材料，随相对

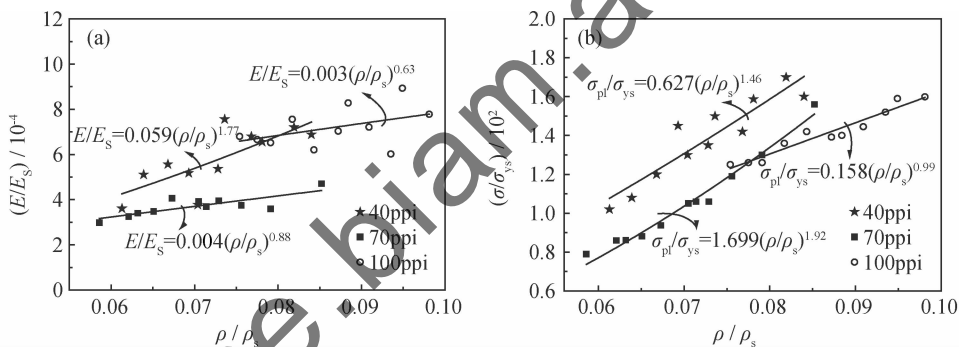


图3 泡沫铜力学参数与相对密度的关系 (a)相对弹性模量;(b)相对平台应力

Fig. 3 Mechanical properties of porous copper with respect to pore-size (a)relative modulus;(b)relative yield strength

密度的增大，材料的弹性模量和平台应力都有显著的增大趋势。材料的平台应力大小直接关系到材料的吸能特性，这说明材料的相对密度是影响其力学性能的关键因素。图 3 还显示当相对密度相同时，材料的孔径大小对其力学参数也是有影响的。

### 2.2.2 相对密度对密实应变的影响

在大压缩变形条件下，开孔泡沫材料的孔穴棱杆屈服后被完全压垮，整个试件的孔隙全部被压实。此情形发生时，应力-应变曲线陡然上升，达到密实应变  $\epsilon_D$  时，斜率将最终趋于基体材料的弹性模量  $E_s$ 。将  $\epsilon_D$  的实验数据绘于图 4，并对其进行线性拟合，可见三种孔隙度材料的密实应变均随相对密度的增大而有下降的趋势，这是因为相同孔径的情况下，材料相对密度越大越接近密实化状态，达到密实化所需的应变就越小。

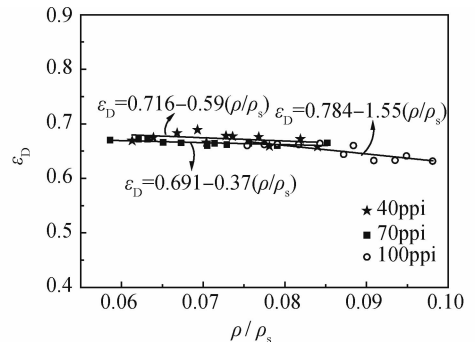


图4 相对密度对密实应变的影响

Fig. 4 The influence of relative density on densification strain

### 2.2.3 孔洞尺寸对弹性模量和平台应力的影响

此前，众多研究仅仅考察了相对密度对多孔材料力学性能的影响，并认为其弹性模量和屈服应力只受材料相对密度的影响。但由图 3 和图 4 可以看出，材

料的密实应变只与相对密度有关,而弹性模量和平台应力不但受相对密度的影响,而且在相对密度一定时,随 ppi 的不同而不同。当相对密度低于 0.077 时,ppi 为 40 的材料,其弹性模量和平台应力明显高于 ppi70 的情况。而在相对密度大于 0.08 的情况,ppi 越大其平台应力越低,即平台应力随孔径的增大而增大。

实验证明,多孔泡沫金属孔径大小对弹性模量和

平台应力都是有影响的。类似的研究结果,也在其他的研究中发现<sup>[10]</sup>。为进一步分析其中的原因,考虑到实验所用材料为板料,对具有相同相对密度的三种不同孔径的开孔泡沫铜材料面内和厚度方向分别拍摄了 SEM 显微照片,如图 5 所示。由图 5 可见,该材料的微观结构在面内和厚度方向存在明显的差异,即面外方向孔径长度明显比面内方向要大。

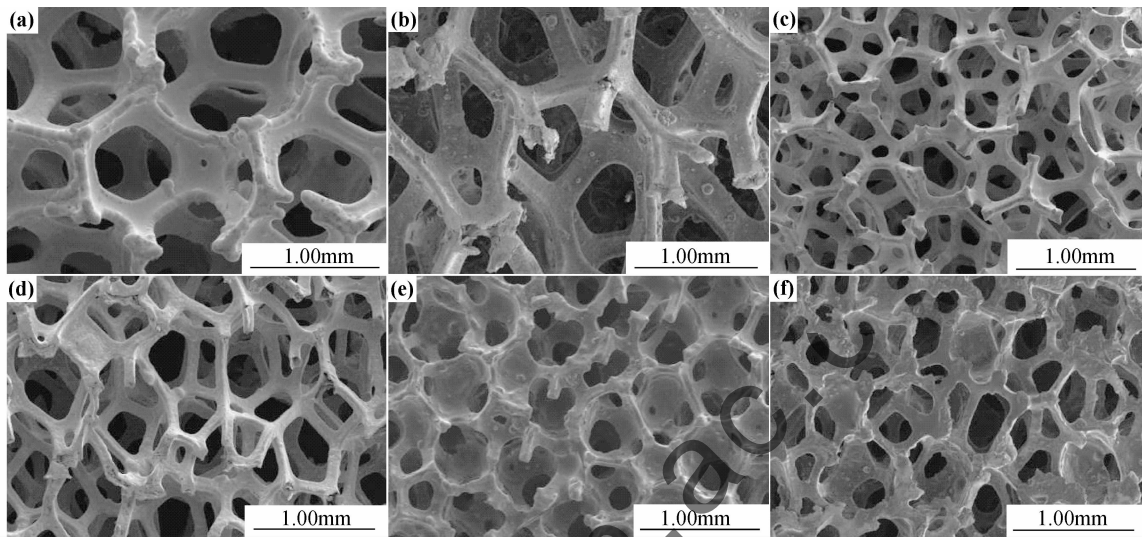


图 5 不同孔隙度多孔泡沫铜材料的显微结构

(a)40ppi 面内方向;(b)40ppi 厚度方向;(c)70ppi 面内方向;(d)70ppi 厚度方向;(e)100ppi 面内方向;(f)100ppi 厚度方向  
Fig. 5 Microstructure of the porous copper materials (a)in-plane for 40 ppi;  
(b)out-plane for 40ppi;(c)in-plane for 70ppi;(d)out-plane for 70ppi;(e)in-plane for 100ppi;(f)out-plane for 100ppi

为了对此作详细分析,采用如图 6 所示的模型,设面内方向为  $xy$  方向,而面外为  $z$  方向,孔隙沿面内方向的平均孔径为  $l_{xy}$ ,而厚度方向(即面外方向)的平均孔径为  $l_z$ ,则通过对上述微观结构图的测量,得到了三种不同孔隙度材料面内方向和厚度方向孔径比( $l_{xy}/l_z$ ),如图 7 所示。由图 7 可见,该材料两个不同方向孔径比随着 ppi 的增大而增大,并且逐渐趋于均匀。

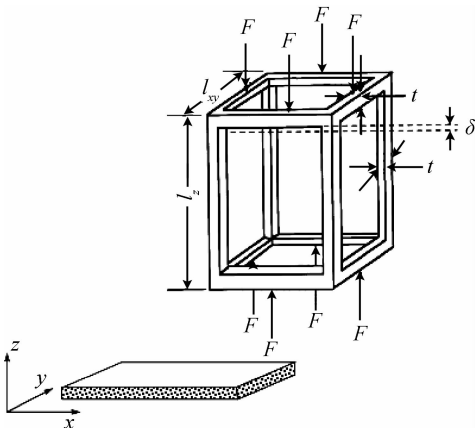


图 6 立方体模型示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of the cubic model

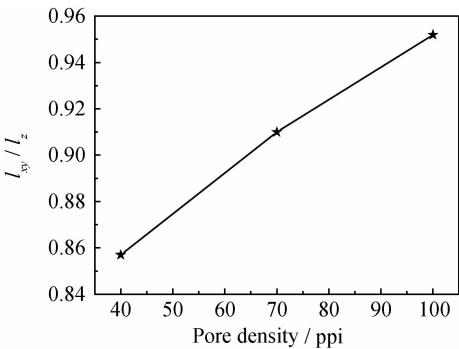


图 7 材料在面内与面外的孔径分析结果

Fig. 7 The ratio between the in-plane and out-plane pore sizes

为分析该材料微结构特征对其宏观力学性能的影响,借助如图 6 所示的立方体交错模型对该材料微结构特征对其宏观力学性能的影响进行分析。假设孔隙的棱柱截面为正方形,且其宽度为  $t$ ,则根据文献[2]的结论,多孔材料的宏观体积和质量分别可以表示为如下关系:

$$V \propto l_{xy}^2 l_z \tag{1}$$

$$m \propto (2l_{xy} + l_z)^2 t^2 \rho_s \tag{2}$$

则材料的宏观相对密度:

$$\frac{\rho}{\rho_s} = C_1 \left( \frac{t}{l_{xy}} \right)^2 \cdot \left( 1 + \frac{2l_{xy}}{l_z} \right) \quad (3)$$

另一方面,材料在厚度方向的弹性模量和平台应力分别有如下规律:

$$\frac{E}{E_s} = C_2 \cdot \left( \frac{t}{l_{xy}} \right)^4 \cdot \left( \frac{l_z}{l_{xy}} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} = C_3 \cdot \left( \frac{t}{l_{xy}} \right)^3 \quad (5)$$

以上各式中  $C_1, C_2, C_3$  为比例常数。根据式(3),在相对密度相同的条件下  $l_{xy}/l_z$  越小,则  $t/l_{xy}$  越大。因此,由式(4),(5)可知,其厚度方向的无量纲弹性模量以及平台应力也会变大。该分析结果显示,该材料 ppi 不同所造成的力学性能差异主要来自于其面内和面外方向的结构各向异性。

### 3 结论

(1)多孔泡沫铜材料的平台应力和弹性模量均随相对密度的增大呈幂函数变化规律,材料的密实应变随相对密度的增大而降低。另外,在相对密度相同的条件下,该材料的平均孔径对弹性模量和平台应力也有非常明显的影响。

(2)通过对材料微观特性的分析发现,其原因主要体现在材料孔棱的长度在材料面内和面外两个方向上的分布差异有关。随平均孔径的增大材料面内和厚度方向的孔径比越大,从而造成材料平台应力和弹性模量的明显增大。因此,该多孔金属材料力学性能对其平均孔径的依赖性是由材料微结构的各向异性造成的。该研究成果为该材料的力学设计和工程应用提供了相关参考。

#### 参考文献

- [1] 卢天健,何德坪,陈常青,等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J]. 力学进展,2006,36(4): 517—535.  
LU Tian-jian, HE De-ping, CHEN Chang-qing, et al. The multifunctionality of ultra-light porous metals and their applications [J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(4): 517—535.
- [2] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids: structures and properties [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [3] VAN DER BURG M M D, SHULMEISTER V, VAN DER GEIJSSEN E, et al. On the linear elastic properties of regular and random open-cell foam models [J]. J Cell Plast, 1997, 33(1): 31—54.
- [4] ZHU H X, WINDLE A H. Effects of cell irregularity on the high

strain compression of open-cell foams [J]. Acta Materialia, 2002, 50(5): 1041—1052.

- [5] WARREN W E, KRAYNIK A M. The linear elastic properties of open cell foams [J]. J Appl Mech, 1988, 55(2): 341—346.
- [6] NIEH T G, HIGASHI K, WADSWORTH J. Effect of cell morphology on the compressive properties of open-cell aluminum foams [J]. Material Science and Engineering, 2002, 283(1—2): 105—110.
- [7] ONCK P R, ANDREWS E W, GIBSON L J. Size effects in ductile cellular solids. Part I: modeling [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(3): 681—669.
- [8] 卢子兴,王建月. 开孔 Voronoi 泡沫支柱形状变化对力学性能的影响[J]. 航空动力学报, 2009, 24(9): 2008—2011.  
LU Zi-xing, WANG Jian-yue. Influence of cell strut shape on the mechanical properties of Voronoi open-cell foams [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(9): 2008—2011.
- [9] 赵隆茂,宋延泽,李志强. 基于 Voronoi 随即模型研究多孔材料的动态特性[J]. 机械强度, 2009, 31(6): 932—938.  
ZHAO Long-mao, SONG Yan-ze, LI Zhi-qiang. Study of the dynamic crushing behavior of cellular materials by using the Voronoi random models [J]. Journal of Mechanical Strength, 2009, 31(6): 932—938.
- [10] 潘艺,胡时胜,凤仪,等. 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 Shi-sheng, FENG Yi, et al. Cell-size effect on mechanical properties of open-cell aluminum alloy foam [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(4): 171—175.
- [11] 刘培生,夏风金,罗军. 多孔材料模型分析[J]. 材料工程, 2009, (7): 83—87.  
LIU Pei-sheng, XIA Feng-jin, LUO Jun. Analyses of the classical model for porous materials [J]. Journal of Materials Engineering, 2009, (7): 83—87.
- [12] 曹晓卿,王志华,马宏伟,等. 微观结构对多孔材料细观力学特性的影响[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(1): 1—4.  
CAO Xiao-qing, WANG Zhi-hua, MA Hong-wei, et al. The effects of micro-structure on the equivalent elastic constants of cellular materials [J]. Journal of Taiyuan University of technology, 2006, 37(1): 1—4.
- [13] 许庆彦,熊守美. 多孔金属的制备工艺方法综述[J]. 铸造, 2005, 54(9): 840—843.  
XU Qing-yan, XIONG Shou-mei. Manufacturing processes of porous metals [J]. Foundry, 2005, 54(9): 840—843.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(11102025);爆炸科技与技术国家重点实验室自主基金项目(QNKT11-03)

**收稿日期:**2012-09-13; **修订日期:**2013-05-20

**作者简介:**张晓伟(1982—),男,博士,讲师,主要从事冲击动力学、吸能材料与结构、结构非线性等问题的研究,联系地址:北京市海淀区北京理工大学机电学院(100081),E-mail: meizhangxw@bit.edu.cn