

# 泡沫金属尺寸效应和约束条件下的压缩性能

李志斌<sup>1</sup>, 李雪艳<sup>1,2</sup>

(1. 国防科技大学 文理学院, 湖南 长沙 410073)

(2. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 通过准静态单轴压缩和径向约束轴向压缩实验, 研究了闭孔泡沫铝的尺寸效应, 分析了试件尺寸 (直径和高度) 和密度对泡沫材料力学性能的影响。结果表明: 单轴压缩时闭孔泡沫铝力学性能具有较为明显的尺寸效应, 而径向约束轴向压缩时闭孔泡沫铝的尺寸效应不明显。2 种加载情况下, 密度都对闭孔泡沫铝的力学性能有着明显的影响。与单轴压缩相比, 径向约束轴向压缩时闭孔泡沫铝的屈服应力和平台应力随密度的变化更为显著。

**关键词:** 闭孔泡沫铝; 单轴压缩; 径向约束; 尺寸效应; 密度

**中图分类号:** TB383

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2020)09-3203-06

泡沫金属性能优异, 具有超轻、比强度高、能量吸收大等优点, 兼具功能和结构双重作用, 在航空航天、交通运输、防护工程等领域的缓冲装置、减震设施和保险杠中都有广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。

泡沫金属材料的细观结构特征 (胞元、胞壁和缺陷等) 是影响其力学性能的主要因素<sup>[3-5]</sup>。由于泡沫金属材料的孔径较大, 在一定的小尺度范围内连续介质力学理论不再适用, 因此泡沫金属的尺寸影响 (尺寸效应) 不可忽略。潘艺等<sup>[6]</sup>和 Cao 等<sup>[7]</sup>分别通过对多种孔径、多种密度的开孔泡沫铝材料开展准静态和动态压缩实验发现, 胞孔尺寸不仅影响泡沫铝的屈服强度和塑性模量, 还会影响其应变率敏感性, 且不同孔径的泡沫铝具有不同的理想吸能效率。王鹏飞<sup>[8]</sup>等开展了准静态压缩实验研究, 从泡沫材料密度分布离散性的角度分析了尺寸效应。Tekoglu 等<sup>[9]</sup>和 Chen 等<sup>[10]</sup>分别基于 Voronoi 模型和 Laguerre 模型通过细观数值模拟的方法系统研究了泡沫材料的尺寸效应。目前, 对于泡沫金属的尺寸效应还没有一个统一的结论。

目前, 文献中已有研究工作大多集中于探讨泡沫金属在单轴加载时的力学行为, 但是泡沫金属在实际应用中遭受的载荷作用往往不是单向的而是复杂的。因而研究泡沫金属在多轴复杂加载下的力学行为是非常必要的。王二恒等<sup>[11]</sup>开展了泡沫铝的单轴压缩、三轴静水压缩、三轴等比例压缩和径向约束轴向压缩实验, 分析得到了其轴向宏观应力-应变曲线。Zhou 等<sup>[12]</sup>采用 ARCAN 双轴加载装置, 开展了不同应变率下的闭孔泡

沫铝双轴加载实验, 测得了闭孔泡沫铝的实验屈服面。Ruan 等<sup>[13]</sup>也开展了闭孔泡沫铝的三轴压缩实验研究。不过, 由于实验加载条件和测量手段的限制, 对泡沫金属在多轴加载下的力学行为的认识还相对有限。

本实验研究了泡沫金属在准静态单轴压缩和径向约束轴向压缩时的力学性能。首先对不同高度和不同直径的闭孔泡沫铝试件进行了实验研究, 分析了闭孔泡沫铝的尺寸效应, 确定了合适的试件尺寸; 然后研究了闭孔泡沫铝的准静态单轴压缩和径向约束轴向压缩力学性能, 并分析了闭孔泡沫铝密度的影响。

## 1 实验研究

### 1.1 材料与试样

实验中采用的是一种商用闭孔泡沫铝材料。原材料块体尺寸为 400 mm × 400 mm × 65 mm, 胞元孔径约 2 mm。实验中采用圆柱形试件, 通过线切割分别截取直径  $D = 32$  mm、高度  $h = 5, 8, 10, 12, 15$  mm, 以及高度  $h = 15$  mm、直径  $D = 15, 20, 32, 40, 50$  mm 的试件。原材料共加工成 80 个试件。图 1 给出了闭孔泡沫铝原材料块体加工得到的试件的密度分布。可见, 泡沫铝试件的密度离散性较小, 主要集中在 0.50~0.55 g/cm<sup>3</sup> 之间, 试件密度分布基本符合正态分布。为了防止试件局部密度分布不均匀对实验结果造成影响, 选取密度近似 (0.50~0.55 g/cm<sup>3</sup>) 的试件进行尺寸效应研究。

### 1.2 准静态压缩实验

收稿日期: 2019-10-11

基金项目: 国家自然科学基金 (11402299); 湖南省自然科学基金 (2017JJ3359)

作者简介: 李志斌, 男, 1985 年生, 博士, 副教授, 国防科技大学文理学院, 湖南 长沙 410073, 电话: 0731-87001882, E-mail: lizhibin@nudt.edu.cn

准静态实验在材料三轴试验机上进行，加载的名义应变率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$ 。通过一个 25 mm 壁厚的 45# 钢套筒来对圆柱形试件施加径向约束以开展径向约束轴向压缩实验。套筒刚度相对于闭孔泡沫铝的变形刚度大很多，其变形基本上可以忽略不计，因此可以认为泡沫铝试件在径向没有变形。图 2 为径向约束轴向压缩实验装置实物图，图 3 为不同直径的泡沫铝试样径向约束轴向压缩实验装置图。图 4 为得到的典型应力-应变曲线结果。图中给出了尺寸为  $D = 32 \text{ mm}$ ,  $h = 10 \text{ mm}$ ，密度  $\rho = 0.50 \text{ g/cm}^3$  的试件的 3 组实验数据，3 组数据的应力-应变曲线反映出实验结果具有良好的重复性。其他工况下实验数据的重复性也都类似，因此在后续的结果分析中，均取各工况下所有有效曲线的平均值作为该工况的应力-应变曲线进行比较。

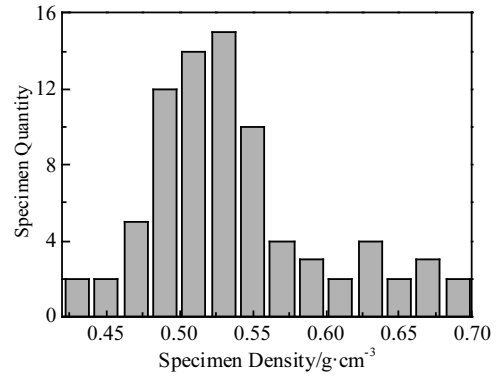


图 1 原材料块体加工得到的试件的密度分布

Fig.1 Density distribution of the aluminum foam specimens cut from bulk material



图 2 径向约束轴向压缩实验装置图

Fig.2 Experimental device for uniaxial compression with lateral constraint: (a) side view, (b) top view, and (c) assembly view

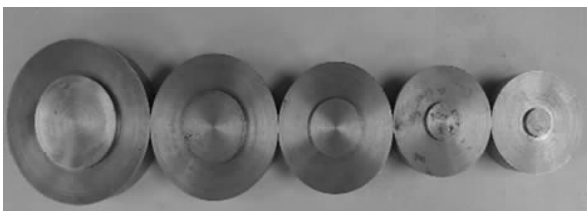


图 3 不同直径的泡沫铝试件径向约束轴向压缩实验图

Fig.3 Scheme of foam specimens with different diameters subjected to uniaxial compression with lateral constraint

## 2 结果与分析

平台应力和压实应变是泡沫金属力学性能的 2 个标志性参量。将闭孔泡沫铝材料应力-应变曲线的初始应力峰值定义为屈服应力  $\sigma_y$ ，相应的应变为屈服应变  $\epsilon_y$ 。通过应力-应变曲线积分得到能量吸收效率曲线，将能量吸收效率达到最大时的应变定义为材料的压实应变  $\epsilon_d$ 。泡沫材料的平台应力  $\sigma_{pl}$  则通过下式确定：

$$\sigma_{pl} = \frac{1}{\epsilon_d - \epsilon_y} \int_{\epsilon_y}^{\epsilon_d} \sigma_y d\epsilon \quad (1)$$

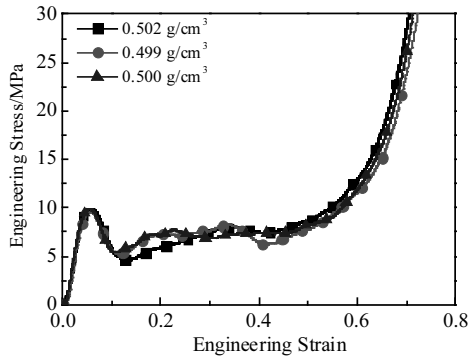


图 4 典型应力应变曲线及实验结果的重复性

Fig.4 Typical stress-strain curves for quasi-static uniaxial compression

式中,  $\sigma_y$  和  $\varepsilon_y$  分别为屈服应力和屈服应变,  $\varepsilon_d$  为压实应变。

### 2.1 试件高度的影响

图 5 为密度和直径相同时, 不同高度的闭孔泡沫铝单轴压缩应力-应变曲线。从图中可以看出, 相同密度和直径的泡沫铝试件, 随着试件高度的增大, 单轴压缩屈服应力和平台应力逐渐降低, 但是在试件高度达到  $h = 10 \text{ mm}$  时会趋向恒定。另外, 随着试件高度的增大, 泡沫铝的压实应变逐渐变大, 试件较晚进入压实阶段。从实验结果看, 当试件高度大于 12 mm 时, 试件高度对泡沫铝压缩力学性能影响不再明显, 尺寸效应的影响可以忽略。因此, 对闭孔泡沫铝材料, 可以选取试件高度  $h = 12 \text{ mm}$ , 此时的试件尺寸与胞孔直径之比大于 6~8。图 6 为密度和直径相同时, 不同高度的闭孔泡沫铝径向约束轴向压缩应力-应变曲线。从图中可以看出, 当试件高度大于 10 mm 时, 试件高度对泡沫铝压缩力学性能的影响基本可以忽略。

图 7 是闭孔泡沫铝的屈服应力、平台应力和压实应变随试件高度的变化。从图中可看出, 相对于单轴压缩, 径向约束轴向压缩时试件高度对泡沫铝的屈服强度、平台应力和压实应变的影响较小。其原因可能是, 径向约束轴向压缩时闭孔泡沫铝的受力状态发生变化, 由单轴压缩时的一维应力状态转变为一维应变状态。由于泡沫铝横向变形受到刚性套筒的约束, 试件上下端面的摩擦力影响变小。

### 2.2 试件直径的影响

图 8 为密度和高度相同时, 不同直径的闭孔泡沫铝压缩应力-应变曲线。从图中可以看出, 相同密度和高度的闭孔泡沫铝试件, 随着试件直径的增大, 单轴压缩平台应力会相应增大, 但是当试件直径达到  $D =$

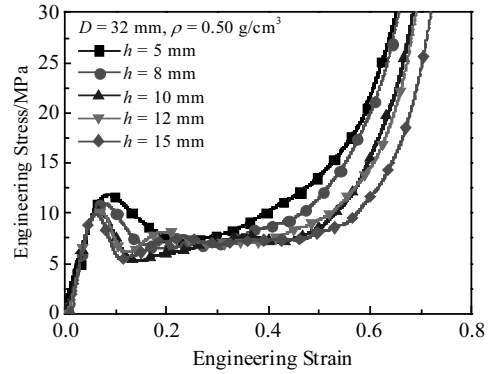


图 5 试件高度对泡沫铝单轴压缩性能的影响

Fig.5 Effect of specimen height on the uniaxial compressive properties of aluminum foam

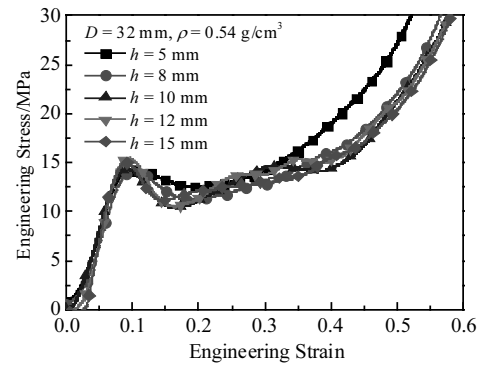


图 6 试件高度对泡沫铝径向约束轴向压缩性能的影响

Fig.6 Effect of specimen height on the uniaxial compressive properties of aluminum foam with lateral constraint

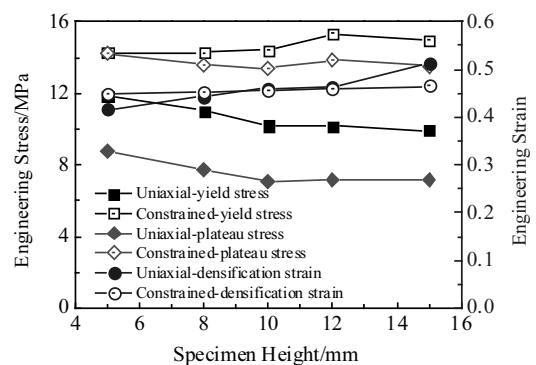


图 7 泡沫铝压缩性能随试件高度的变化

Fig.7 Variation of compressive properties of aluminum foam with specimen height

32 mm 时平台应力基本保持恒定。且随着试件直径的增大, 泡沫铝压实应变逐渐变小, 材料提早进入压实阶段。图 9 为密度和高度相同时, 不同直径的闭孔泡

沫铝径向约束轴向压缩应力-应变曲线。从图中同样可以看出，当试件直径达到 32 mm 时，试件直径对径向约束轴向压缩力学性能的影响基本可以忽略。

图 10 是闭孔泡沫铝的屈服应力、平台应力和压实应变随试件直径的变化。相比较单轴压缩，可以看出径向约束轴向压缩时试件直径对泡沫铝的屈服强度、平台应力和压实应变的影响变小。

Tekoglu 等<sup>[9]</sup>通过数值模拟研究了试件尺寸变化对泡沫材料应力应变曲线及屈服应力的影响，得到的结论与本文相符。泡沫铝材料中不可避免会存在孔洞缺陷，而孔洞缺陷的增加会导致材料的压缩强度降低，承载能力下降。增大泡沫铝试件的高度会增大试件中含有孔洞缺陷的概率，从而降低其屈服强度。而当试件高度方向胞元的数量超过 6~8 个时，尺度效应不太明显。

而增大泡沫铝试件的直径会使其平台应力增大。这是因为除了孔洞缺陷外，试件的边界层效应也是主要的影响因素。在闭孔泡沫铝的单轴压缩试验中，试件侧向的自由表面为不承载边界层，其中含有的孔壁

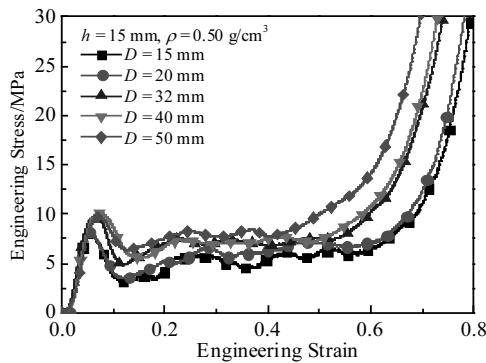


图 8 试件直径对泡沫铝单轴压缩性能的影响

Fig.8 Effect of specimen diameter on the uniaxial compressive properties of aluminum foam

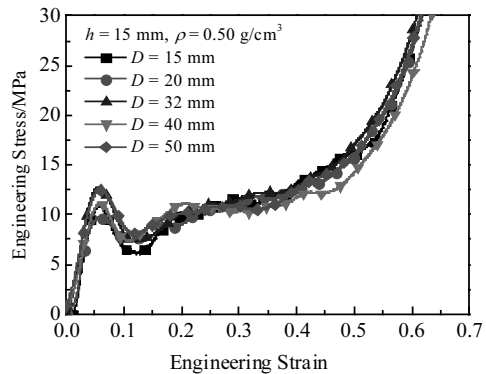


图 9 试件直径对泡沫铝径向约束轴向压缩性能的影响

Fig.9 Effect of specimen diameter on the uniaxial compressive properties of aluminum foam with lateral constraint

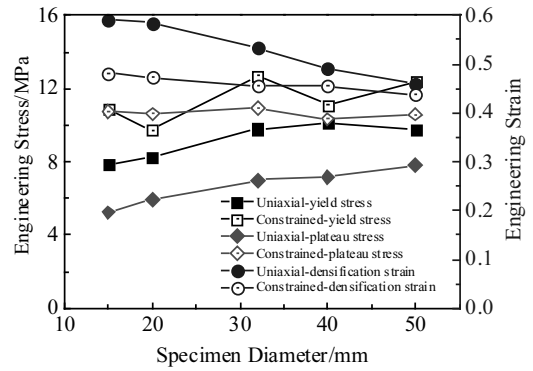


图 10 泡沫铝压缩力学性能随试件直径的变化

Fig.10 Variation of compressive properties of aluminum foam with specimen diameter

称为自由孔壁。降低自由孔壁占整个试件全部孔壁的比值，则能够发挥承载作用的孔洞比例增大，从而泡沫铝材料压缩强度提高，承载能力增强。增大泡沫铝试件的直径时会降低边界层中自由孔壁的比例，从而提高屈服强度。当试件直径增大到一定程度后边界层的影响会减小，使得泡沫铝的力学性能趋向稳定。泡沫铝试件的力学性能尺寸效应正是由于边界层效应和孔洞缺陷 2 种因素的作用。

通过比较单轴压缩和径向约束轴向压缩时试件尺寸的影响可以发现，径向约束轴向压缩时泡沫铝材料力学性能对试件尺寸的敏感程度降低。这是因为在这种情况下抑制了边界层效应。

### 2.3 密度的影响

图 11 为直径和高度相同时，不同密度的闭孔泡沫铝单轴压缩应力-应变曲线。可以看出，密度对闭孔泡沫铝的单轴压缩力学性能有着较为明显的影响。当密度较大时，泡沫铝的屈服应力和平台应力也较大，但压实应变减小。图 12 为直径和高度相同时，不同密度的闭孔泡沫铝径向约束轴向压缩应力-应变曲线。与单轴压缩相比，径向约束轴向压缩时泡沫铝密度的影响更为显著。随着密度的增大，径向约束轴向压缩时泡沫铝的屈服应力和平台应力增长更为明显。

图 13 是闭孔泡沫铝的屈服应力、平台应力和压实应变随密度的变化。单轴压缩时，泡沫铝密度从 0.438 g/cm<sup>3</sup> 增大到 0.669 g/cm<sup>3</sup> 时，屈服应力从 8.34 MPa 增大到 12.38 MPa，平台应力从 5.43 MPa 增大到 12.69 MPa，屈服应力和平台应力分别增大了 48.4% 和 133.7%；而径向约束轴向压缩时，密度从 0.456 g/cm<sup>3</sup> 增大到 0.671 g/cm<sup>3</sup> 时，屈服应力从 11.34 MPa 增大到 17.95 MPa，平台应力从 9.37 MPa 增大到 20.77 MPa，

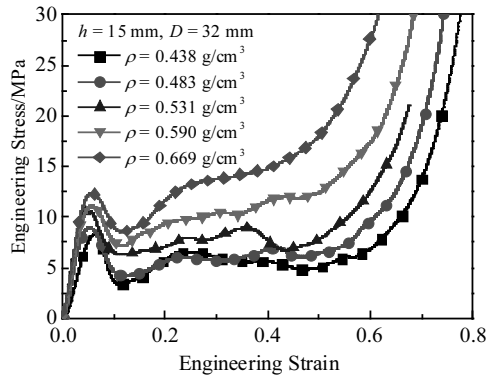


图 11 试件密度对泡沫铝单轴压缩性能的影响

Fig.11 Effect of specimen density on the uniaxial compressive properties of aluminum foam

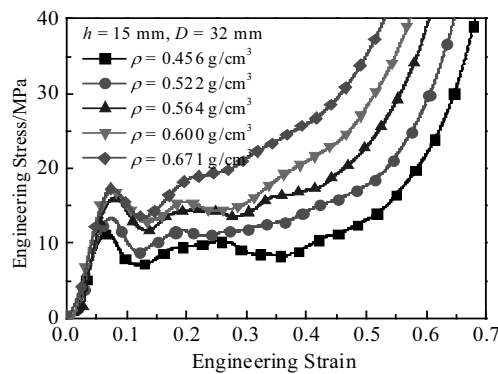


图 12 试件密度对泡沫铝径向约束轴向压缩性能的影响

Fig.12 Effect of specimen density on the uniaxial compressive properties of aluminum foam with lateral constraint

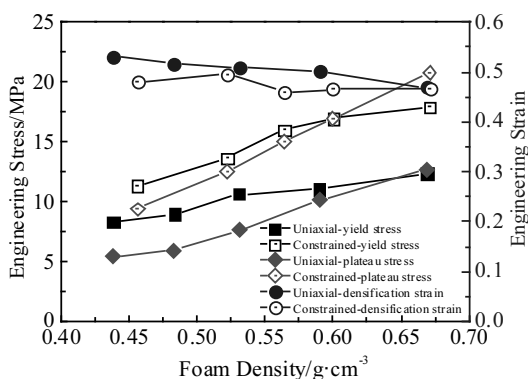


图 13 泡沫铝压缩力学性能随试件密度的变化

Fig.13 Variation of compressive properties of aluminum foam with specimen density

屈服应力和平台应力分别增大了 58.3%和 121.7%。压实应变随密度的变化则不明显。

### 3 结 论

1) 闭孔泡沫铝的单轴压缩力学性能具有较为明显的尺寸效应。当直径不变时，随着试件高度的增大闭孔泡沫铝屈服应力和平台应力减小，然后趋向稳定；当厚度不变时，闭孔泡沫铝屈服应力和平台应力会随着试件直径增大有所提高，然后也趋向稳定。压实应变则有随试件高度的增大而增大，随试件直径的增大而减小的趋势。而闭孔泡沫铝的径向约束轴向压缩力学性能的尺寸效应不明显。

2) 2 种加载情况下，密度都对闭孔泡沫铝的应力-应变关系影响明显。当密度较大时，泡沫铝的屈服应力和平台应力也较大，但压实应变减小。与单轴压缩相比，径向约束轴向压缩时闭孔泡沫铝的屈服应力和平台应力随密度的变化更为显著。

### 参考文献 References

[1] Zhang Jian(张 健), Zhao Guiping(赵桂平), Lu Tianjian(卢天健). *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics* (力学学报)[J], 2015, 47(4): 651

[2] Yan Leilei(闫雷雷), Zhao Xue(赵 雪), Zhao Jingbo(赵静波) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程) [J], 2018, 47(2): 503

[3] Yuan Jianyu, Li Yanxiang. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25: 1619

[4] Wang Yaoqi(王耀奇), Liu Peisheng(刘培生), Hou Hongliang (侯红亮) et al. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(S1): 134

[5] Xu Zhengbin(许正斌), Liu Xiaoteng(刘晓滕), Wang Juan(王娟) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(8): 2169

[6] Pan Yi(潘 艺), Hu Shisheng(胡时胜), Feng Yi(凤 仪) et al. *Engineering Mechanics*(工程力学)[J], 2003, 20(4): 171

[7] Cao Xiaoqing, Wang Zhihua, Ma Hongwei et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2006, 16(2): 351

[8] Wang Pengfei(王鹏飞), Hu Shisheng(胡时胜). *Explosion and Shock Waves*(爆炸与冲击)[J], 2012, 32(4): 393

[9] Tekoglu C, Gibson L J, Pardo T et al. *Progress in Materials Science*[J], 2011, 56: 109

[10] Chen Y, Das R, Battley M. *International Journal of Solids and Structures*[J], 2015, 52: 150

- [11] Wang Erheng(王二恒), Yu Jilin(虞吉林), Wang Fei(王 飞) *et al. Acta Mechanica Sinica (力学学报)*[J], 2004, 36(6): 673
- [12] Zhou Zhiwei, Wang Zhihua, Zhao Longmao *et al. Composites: Part B*[J], 2014, 61: 340
- [13] Ruan D, Lu G, Ong L S *et al. Composites Science and Technology*[J], 2007, 67: 1218

## Size Effects and Compression Properties of Metallic Foams with Lateral Constraint

Li Zhibin<sup>1</sup>, Li Xueyan<sup>1,2</sup>

(1. College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(2. Institute of Electronic Engineering, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Quasi-static uniaxial compression on closed-cell aluminum foam and compression on closed-cell aluminum foam with lateral constraint were performed to study the size effects. The effects of sizes (height and diameter) and density of foam specimen on the mechanical properties of aluminum foam were investigated. The results show that the mechanical properties of closed-cell aluminum foams under uniaxial compression have obvious size effects, while the size effects in closed-cell aluminum foams with lateral constraint are not so obvious. Foam density is critical to the mechanical properties of closed-cell aluminum foams under the two different loading conditions. The dependency of yield strength and plateau stress of aluminum foam with lateral constraint on foam density is found to be more significant.

**Key words:** closed-cell aluminum foam; uniaxial compression; lateral constraint; size effects; density

---

Corresponding author: Li Zhibin, Ph. D., Associate Professor, College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073, P. R. China, Tel: 0086-731-87001882, E-mail: lizhibin@nudt.edu.cn