

文章编号: 1001-1455 (2004)04-0347-05

泡沫金属材料的孔径效应*

田 杰¹, 胡时胜¹, 蒋家桥², 黄西成²

(1. 中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230027;
2. 中国工程物理研究院结构力学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 在分离式霍普金森压杆 (SHPB) 和 MTS 810 材料试验机上分别对泡沫纯铝材料和铝硅合金泡沫材料进行了动态与准静态压缩实验研究。实验结果表明: 孔径的大小对泡沫铝的弹性变形包括弹性模量没有影响, 但对泡沫铝的屈服强度和塑性硬化模量有影响, 且这种影响主要取决于泡沫铝基体材料的韧脆特性, 泡沫铝的相对密度也会影响这种孔径效应。

关键词: 材料力学; 孔径效应; SHPB; 泡沫铝

中图分类号: O374.3 国标学科代码: 430°1010 文献标志码: A

1 引 言

泡沫铝作为一种新型的工程结构材料具有许多优良的性能, 主要是良好的缓冲吸能特性, 另外还有隔音、隔热和耐腐蚀等特性^[1]。因此, 在航空、汽车、桥梁、包装工业等领域都有很广阔的应用前景。国内外有不少关于泡沫铝力学性能的报道^[2], 但是早期的研究主要集中在材料的准静态变形的三阶段的特点分析^[3]。L. T. Gibson 等^[4]已对包括泡沫铝在内的泡沫结构及其力学性能进行了系统研究, 建立了弹性模量和屈服强度等力学量与相对密度之间的关系。最近人们又开始对泡沫铝进行了动态力学性能方面的研究, 讨论泡沫铝合金的缓冲吸收能特性^[5]。然而泡孔尺寸对泡沫铝性能影响的研究很少。T. G. Nieh 等^[6]研究了相对密度和泡孔尺寸对泡沫铝材料的屈服强度、杨氏模量的影响, 得出泡孔尺寸的影响可以忽略不计的结论。P. R. Onck 等^[7]通过建模计算后则认为泡孔尺寸对泡沫材料的力学性能有影响, 认为屈服强度随孔径与试件尺寸比值的增加逐渐增大。鉴于上述两种不同看法, 有必要对泡沫铝材料的孔径效应进行深入的研究, 全面了解泡沫铝这一特殊材料的力学行为特性。

2 实验方案

实验研究包括两部分: 动态和准静态压缩试验。高应变率 ($10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$) 下材料的压缩试验是在 SHPB 装置上进行的。SHPB 的实验装置如图 1 所示。由于泡沫材料的波阻抗较低, 透射波很弱, 因此采用半导体应变片测量透射波信号可使信噪比提高 50 倍, 提高了实验精度。准静态压缩实验 (10^{-3} s^{-1}) 是在 MTS 810 材料试验机上进行的。本

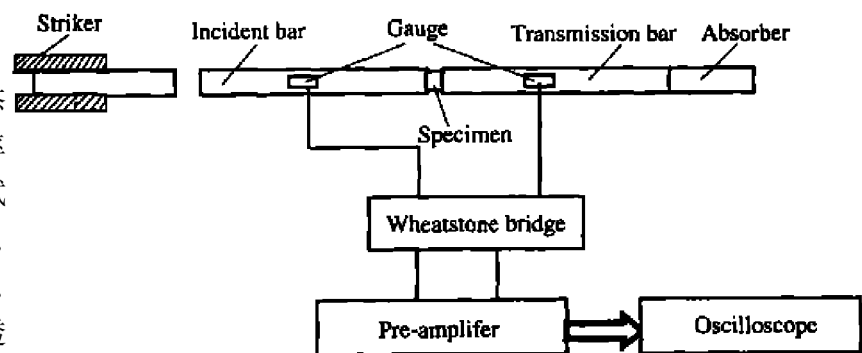


图 1 SHPB 装置示意图

Fig. 1 Schematic of SHPB set-up

* 收稿日期: 2003-07-09; 修回日期: 2004-05-10

基金项目: 国家基金委和中国工程物理研究院联合基金项目 (10076020)

作者简介: 田 杰 (1979—), 女, 博士研究生。

实验所用的两种泡沫材料均由中科院固体物理研究所提供。第一种泡沫铝的基体材料是呈韧性的纯铝，采用渗流铸造法制成；第二种泡沫铝的基体材料是呈脆性的铝硅合金，采用粉末冶金法烧结而成。纯铝的动态和静态试件规格尺寸分别为 $\varnothing 35\text{mm} \times 7.8\text{mm}$ 和 $\varnothing 35\text{mm} \times 20\text{mm}$ ，铝硅合金的动态和静态试件规格尺寸分别为 $\varnothing 30\text{mm} \times 8\text{mm}$ 和 $\varnothing 30\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。

3 实验结果

图2为泡沫纯铝的动静态压缩的实验结果，其中 ρ/ρ_s 表示泡沫金属材料的相对密度， ρ 为泡沫材料的密度， ρ_s 为泡沫基体材料的密度。从实验得到的曲线可以看出，泡沫纯铝变形的第二阶段即屈服段呈逐渐上翘的趋势，也就是说，在屈服段，泡沫铝的应力随应变的增大而略微增加。从图中曲线还可以看出，应变率对其力学性能的影响是十分显著的，但孔径大小对其力学性能的影响是很小的，弹性模量 E 和屈服强度 σ_{pl} 均与孔径大小无关。

图3为三种不同孔径的泡沫铝硅合金的准静态压缩实验结果。其中(a)~(d)分别对应四种不同的相对密度。在每幅图中不同孔径应力-应变曲线的弹性段基本重合，表明与泡沫纯铝一样，泡沫铝硅合金的弹性模量 E 仅与相对密度有关，而与孔径大小无关。然而泡沫铝硅合金的屈服强度 σ_{pl} 除了与相对密度有关之外，还与孔径的大小有关。另外孔径大小对泡沫铝硅合金的塑性(硬化)模量的影响很大。孔径小，

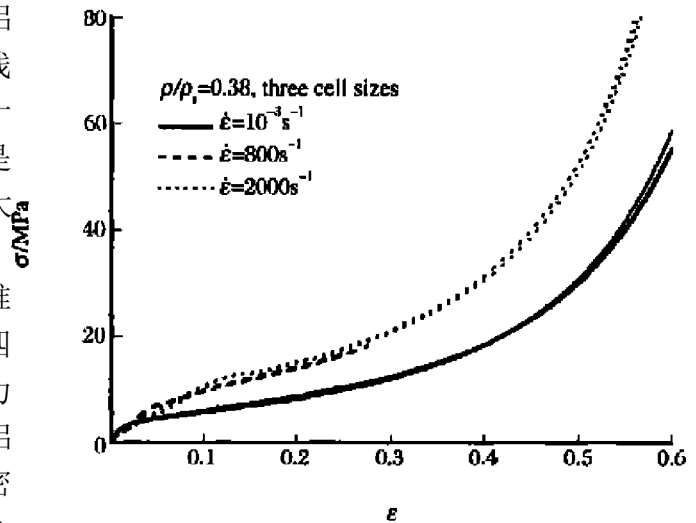


图2 三种孔径、三种应变率下泡沫纯铝压缩应力-应变曲线
Fig.2 Compression stress-strain curves of three cell sizes of aluminum foam under three strain rate

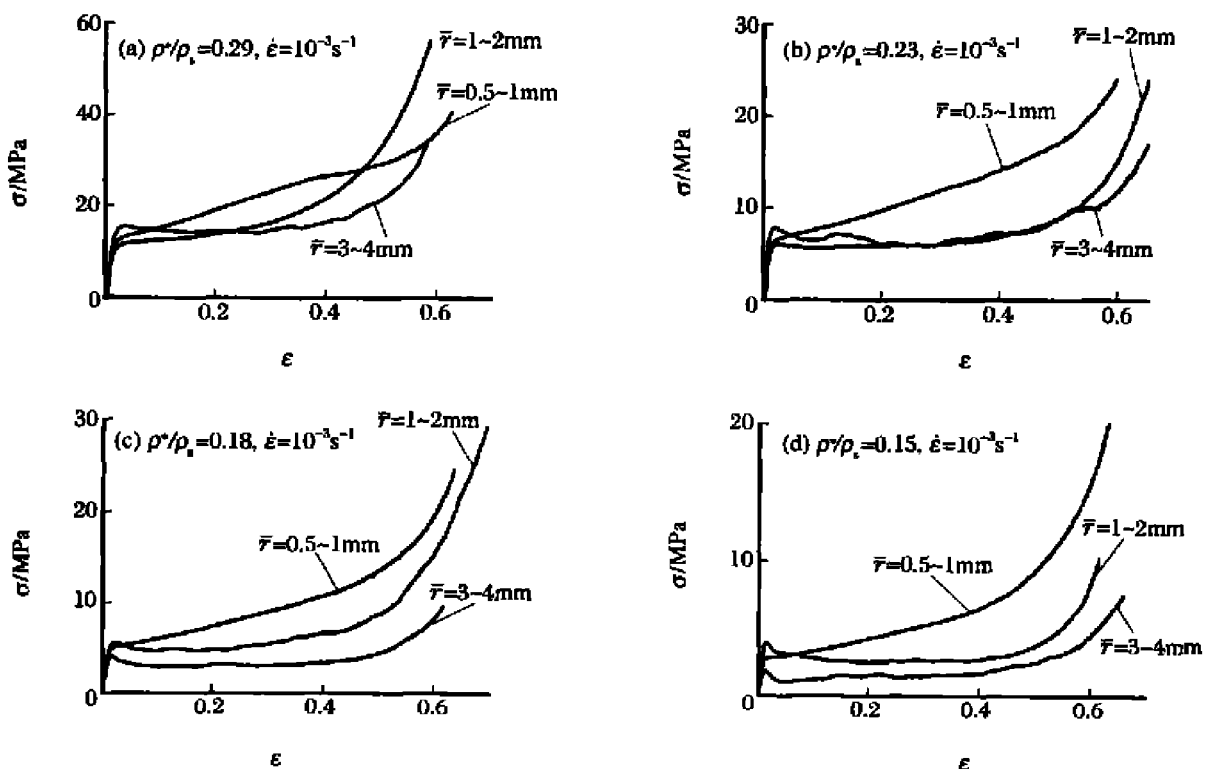


图3 泡沫铝硅合金准静态压缩应力-应变曲线

Fig.3 Quasi-static compression stress-strain curves of aluminum-silicon foam

其塑性模量大, 应力随应变增大; 孔径大, 其塑性模量小, 并趋于 0, 呈现出明显的屈服平台。此外, 孔径大, 其应力-应变曲线的所谓过冲及在屈服阶段的抖动变得明显, 表明了大孔径泡沫铝硅合金在其泡孔被压垮过程中的不断失稳。而孔径较小时则没有这种现象, 其应力-应变曲线比较光滑。图 4 为泡沫铝硅合金相对密度为 0.23 的三种不同孔径的动态应力-应变曲线。结果表明: 在动态加载条件下, 泡孔孔径对力学性能的影响比准静态的情况更加明显。在 $\epsilon=0.20$ 时, 泡孔孔径 \bar{r} 的流动应力 σ_s 分别为孔径为 0.5~1mm 和 3~4 mm 的 1.8 倍和 3.6 倍。

4 分析

T.G.Nieh 等^[6] 在讨论开孔泡沫材料孔径效应时, 设想泡孔结构可以近似认为是一个立方框体, 棱横截面为 $t \times t$, 棱边长为 l , 如图 5 所示。当这个单元在纵向受到力 F 的作用时, 按照 Gibson & Ashby 的方法^[4] 建立了泡沫体的弹性模量 E_1 与基体弹性模量 E_0 的关系: $E_1/E_0 = C_1 (t/l)^4$, 其中 C_1 是几何参数。利用这一公式可以证明相同密度的泡沫材料的弹性模量相等, 而与泡孔的尺寸无关。

第一种泡沫铝的基体纯铝呈韧性, 无论是动态还是准静态, 在变形的全过程, 由于基体韧性好, 泡孔的变形是均匀的, 结构未发生局部失稳, 如图 6 所示。泡沫铝变形的不同阶段泡孔都被均匀压缩, 说明泡沫铝即使在动态压缩过程的变形也是均匀的。在应力-应变曲线上表现为曲线十分平滑, 应力随应变逐渐上升, 表现出塑性硬化过程, 它的宏观力学性能与泡孔尺寸无关。P.R.Onck 等^[7] 认为孔径大小会对泡沫材料的力学性能产生影响, 认为这种影响主要由试件周围有一层没有承载的自由孔壁存在引起的。然而这种解释只能说明孔径尺寸相对于试件尺寸偏大时, 将导致实验数据的分散性, 而不能解释上述泡沫铝硅合金的孔径效应。铝硅合金呈现明显的脆性, 这种材料的泡沫金属在变形的时候泡孔受压很容易破碎失稳, 变形首先起源于薄弱处。显微观察表明, 其变形是不均匀的(图 7)。又由于我们选用的泡沫铝硅合金的相对密度较低, 因而这种失稳就表现得更为明显。这种失稳影响着泡孔的变形特性, 从而影响着泡沫材料的宏观力学性能。

为了解释第二种泡沫铝硅合金的孔径效应, 仍可选用图 5 作为泡孔的结构, 但这时的变形已不是以孔壁的弯曲和形成塑性较为主了, 而应该是由泡孔的失稳引起的。所以可以通过讨论两端铰支的压杆稳定问题对实验现象做出解释。长度为 l 的压杆失稳的临界压力为: $p_{cr} = \pi^2 EI/l^2$, 其中 I 为惯性矩, 显然临界失稳载荷 p_{cr} 的不同是由于惯性矩的差异引起的。可以证明: 相对密度不变时, 孔径越大, I 也越大, p_{cr} 也就越大, 那么 σ_{pl} 也就越大^[8]。当相对密度比较低时, 孔径的影响更加明显, 这点可以从图 3

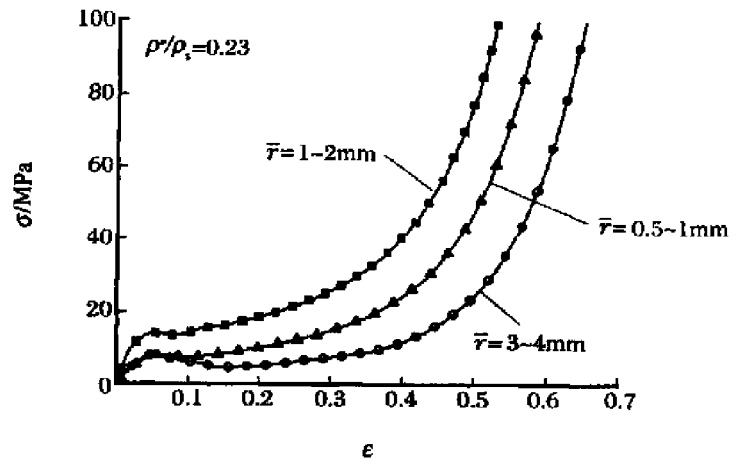


图 4 泡沫铝硅合金三种孔径动态压缩应力-应变曲线
Fig.4 Dynamic compression stress-strain curves of three cell sizes of aluminum-silicon foam

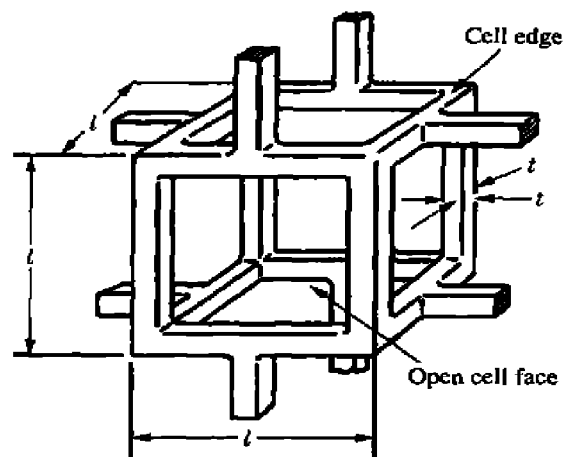


图 5 泡孔立方框体单元
Fig.5 A cubic unit of foam cell

(c)、(d)看出。对于小孔径,在垂直于加载方向的截面上泡孔的平均数目较多,当材料进入屈服阶段,单个泡孔被压垮,不会引起承载力的明显减弱,泡孔的逐个被压垮仍能保持应力-应变曲线平稳光滑,而且由于基体材料的加工硬化特性,其承载能力还有所增加,塑性模量大于零。如果孔径大,在垂直于加载方向的截面上泡孔的数目就少,一旦进入屈服后,每个泡孔的失稳都会引起承载力的明显变化,从而导致应力应变曲线的“过冲”及平台阶段的抖动。

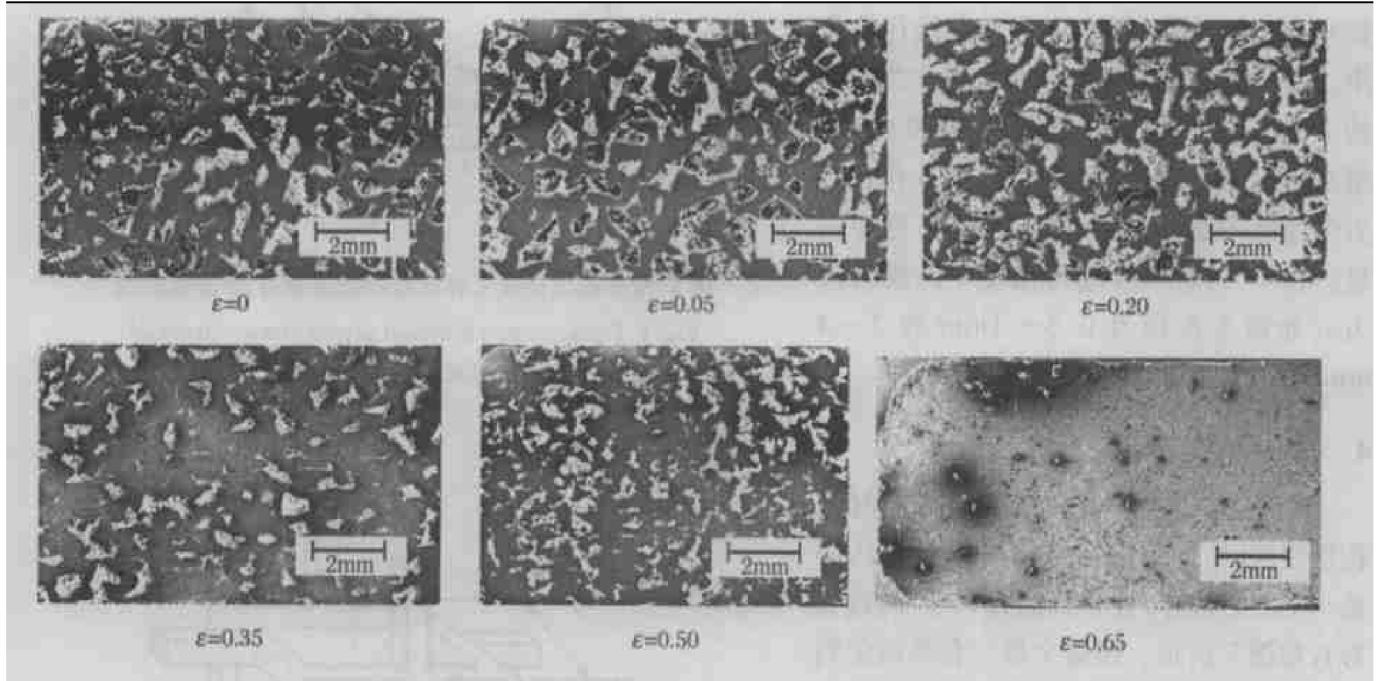


图 6 泡沫铝动态压缩变形图($\bar{r}=1.0\text{mm}$)

Fig.6 SEM photographs of Al foam by dynamic compression($\bar{r}=1.0\text{mm}$)

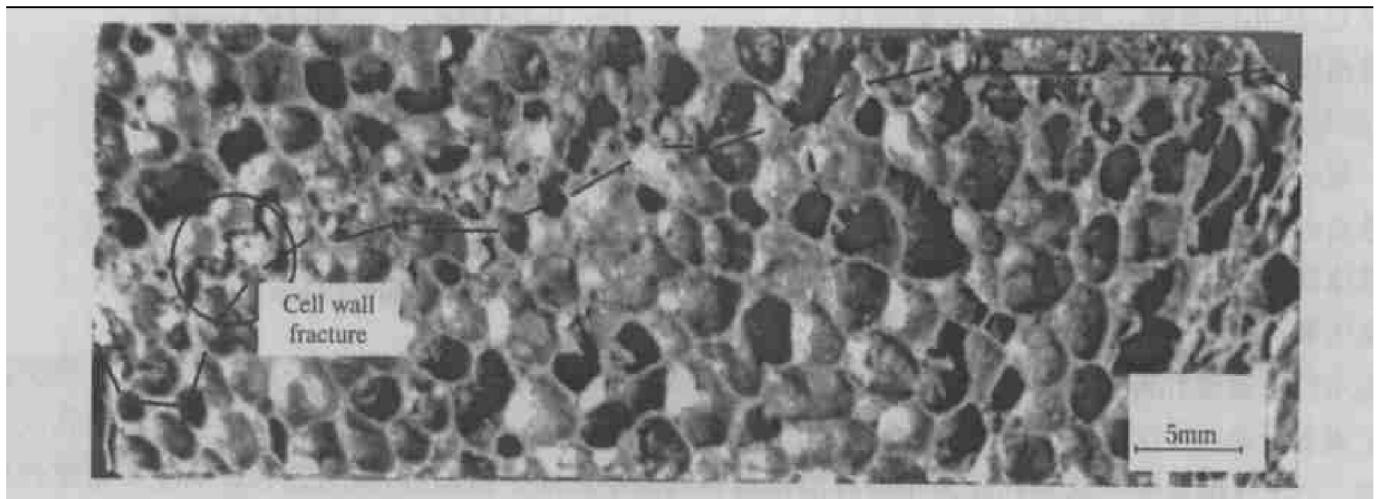


图 7 铝硅合金变形微观分析

Fig.7 Microstructure of deformed aluminum-silicon foam

5 结 论

(1)泡沫铝的孔径大小对泡沫铝的弹性变形及弹性模量没有影响,但对泡沫铝的屈服强度及塑性硬化模量因不同情况有所影响。在我们所选择的两种泡沫铝的材料中,泡沫纯铝基本没有影响,泡沫铝硅合金的影响比较明显。

(2)泡沫铝孔径大小对力学性能的影响主要取决于泡沫铝的基体材料,基体材料呈韧性的没有影响,基体材料呈脆性的则有影响。另外泡沫铝材料的相对密度也有影响,相对密度越小,孔径的影响就越明显。

参考文献:

- [1] 王祝堂. 泡沫铝材: 生产工艺、组织性能及应用市场(2)[J]. 轻合金加工技术, 1999, 27(1): 1—6.
WANG Zhu-tang. Aluminum foams: Production processes structure and properties, applications and markets(2)[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 1999, 27(1): 1—6.
- [2] San Marchi C, Mortensen A. Deformation of open-cell aluminum foam[J]. Acta Mater, 2001, 49(19): 3959—3969.
- [3] 王曦, 虞吉林. 泡沫铝的单向力学行为[J]. 实验力学, 2001, 16(4): 438—443.
WANG-Xi, YU Ji-lin. Uniaxial mechanical behavior of aluminum foam[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(4): 438—443.
- [4] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids[A]. Structure and Properties[M]. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.
- [5] 程和法, 黄笑梅, 许玲. 泡沫纯铝的压缩与吸能性的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 25(6): 12—14.
CHENG He-fa, HUANG Xiao-mei, XU Ling. Investigation on compressive behavior and energy absorbing of Al-Mg alloy foams[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2002, 25(6): 12—14.
- [6] Nieh T G, Higashi K, Wadsworth J. Effect of cell morphology on the compressive properties of open-cell aluminum foams[J]. Materials Science and Engineering, 2002, A283: 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: 681—669.
- [8] 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 property of open-cell aluminum foam[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(4): 171—175.

Cell-size effect on mechanical property of aluminum foams

TIAN Jie¹, HU Shi-sheng^{1*}, JIANG Jia-qiao², HUANG Xi-cheng²

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China;

2. Institute of Structural Mechanics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: A variety of experiments on aluminum foam and aluminum-silicon foam are carried out under dynamic loading on SHPB and quasi-static loading on MTS 801 respectively. The experiment results prove: Cell-size has no effect on the elastic deform including elastic modulus of aluminum foam, but has an un-neglectable effect on the plastic modulus and plastic strength of aluminum foam. The effect lies on the toughness or brittleness characters of aluminum foam, the relative density of aluminum foam also has some effect.

Key words: mechanics of explosion; cell-size effect; SHPB; aluminum foam

* Corresponding author: HU Shi-sheng
E-mail address: sshu@ustc.edu.cn
Telephone: 0551-3601249