

文章编号: 1001-1455(2006)02-0169-05

通孔泡沫铝的动态压缩行为^{*}

程和法¹, 黄笑梅¹, 王强¹, 田杰², 韩福生³

(1. 合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 中国科技大学力学与机械工程系, 安徽 合肥 230026;

3. 中国科学院固体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 在 SHPB 装置上对渗流法制备的通孔泡沫铝进行了动态压缩实验, 研究了相对密度为 0.341~0.419 的通孔泡沫铝在 $10^{-3} \sim 2000 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的压缩响应特征和应变率相关性, 并用扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 分析了泡沫铝的压缩变形特征。实验结果表明, 通孔泡沫铝有明显应变率效应, 随应变率上升, 泡沫铝流动应力提高。SEM 观察结果揭示, 在动态压缩下, 通孔泡沫铝宏观上均匀变形, 微观变形机制以泡孔横向伸展坍塌为主。

关键词: 固体力学; 应变率效应; 动态压缩; 通孔泡沫铝

中图分类号: O347.4; TG146.21

国标学科代码: 130·15

文献标志码: A

1 引言

泡沫铝是一种新型轻质结构和功能材料, 具有独特的力学性能和吸能性, 是一种极具应用潜力的缓冲与冲击防护材料^[1~4], 因此, 深入了解泡沫铝的动态响应特征, 对正确评价其冲击吸能性和进行冲击防护设计至关重要。由于泡沫金属具有比泡沫塑料更复杂的孔结构和不规则的孔形状、更多的微观缺陷等^[5~6], 以及不同的制备工艺在基体组织和孔结构及缺陷上的差异, 使其动态力学行为和变形机制比泡沫塑料复杂。V. S. Deshpande 等^[7]在从静态到 5000 s^{-1} 的应变率内对闭孔泡沫铝和开孔泡沫铝的研究表明, 两种泡沫铝的屈服强度均对应变率不敏感; 而 A. D. Kathryn 等^[8]和 T. Mukai 等^[9]却发现闭孔泡沫铝具有明显的应变率效应, A. D. Kathryn 将这种应变率效应归结为压缩气体从破裂的孔洞中流出所造成的, 而 V. S. Deshpande 等^[7]通过计算证明, 泡孔中的气体在绝热压缩下造成的应力升高值仅为 0.05 MPa。从不同的研究结果可知, 泡沫材料的应变率效应与基体材料本身的应变率敏感性、泡孔中气体的压缩与粘滞流动、微观惯性和结构因素相关^[7~8, 10~12], 胡时胜等^[13]认为开孔泡沫铝的应变率敏感性与微观惯性和变形过程中孔壁的碰撞有关。由于泡沫铝, 特别是通孔泡沫铝结构的复杂性, 到目前为止, 对其应变率效应产生机理尚无合理的解释。因此, 本文中通过对不同相对密度的开孔泡沫铝在不同应变率下的压缩实验, 以研究通孔泡沫铝的动态压缩应力应变响应特征、应变率效应、动态下的微观变形机制以及参数的变化对其动态力学性能的影响。

2 实验过程及方法

2.1 通孔泡沫铝的制备

通孔泡沫铝用工业纯铝采用加压渗流法制备而成, 主要工艺过程是: 用一定粒径的 NaCl 粒子置于模具中预热至 $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 再将过热至 $700 \sim 750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的铝液浇入模具中, 在铝液上施加一定压力使其渗入到 NaCl 粒子的缝隙中, 凝固后得到 NaCl/Al 复合铸块, 再通过水溶解去除其中的 NaCl 粒子, 便可得具有三维连通孔结构的开孔泡沫铝。用线切割法从制备的泡沫铝块上切取准静态和动态冲击试样, 准静态

* 收稿日期: 2005-02-02; 修回日期: 2005-05-30

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(03044602)

作者简介: 程和法(1962—), 男, 博士, 教授。

压缩试样尺寸为 $\varnothing 35\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,冲击压缩试样尺寸为 $\varnothing 35\text{ mm}\times 8\text{ mm}$,冲击压缩试样尺寸根据 SHPB 实验要求的一维应力和应力均匀化原则确定,即薄试样、长径比为 1/4.4。泡沫铝试样表观密度(ρ^*)用称重和测量体积的方法计算而得,泡沫铝的相对密度为 ρ^*/ρ_s , ρ_s 为纯铝的密度,实验中制备的通孔泡沫铝(见图 1)的相对密度为 0.341~0.419。

2.2 泡沫铝的压缩实验

泡沫铝准静态压缩在 MTS810.23 材料实验机上进行,在 10^{-3} s^{-1} 的变形速率下进行单向压缩,用计算机自动记录加载量-位移曲线,再经处理后便得泡沫铝准静态压缩 σ - ϵ 曲线。动态压缩实验在 SHPB 装置上进行,根据 SHPB 实验的一维假定和均匀性假定,利用一维应力波理论可得试样的应变率 $\dot{\epsilon}(t)$ 、应变 $\epsilon(t)$ 以及应力 $\sigma(t)$

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{c}{l_0}(\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t), \quad \epsilon(t) = \frac{c}{l_0} \int_0^t (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) dt, \quad \sigma(t) = \frac{A}{A_0} E(\epsilon_i + \epsilon_r + \epsilon_t) \quad (1)$$

式中: ϵ_i 为入射波, ϵ_t 为透射波, ϵ_r 为反射波, E 、 c 和 A 分别为压杆的弹性模量、波速和杆的截面积, A_0 和 l_0 分别为试样的初始截面积和长度。这样,只要测量到 ϵ_i 、 ϵ_t 和 ϵ_r 中的任意两个波形即可用式(1)计算出试样的应力应变关系及其应变率^[14]。试样应变率可通过调节子弹的撞击速度来改变,本实验中体泡沫铝的动态压缩实验的应变率为 $900\sim 2\,000\text{ s}^{-1}$ 。动态压缩实验时,还在泡沫铝试样两端面上涂抹凡士林减少其变形时与压杆端面间的摩擦。

3 实验结果及分析

3.1 泡沫铝动态压缩应力应变特征

图 2 表示不同相对密度的泡沫铝在应变率为 $900\sim 2\,000\text{ s}^{-1}$ 的动态应力应变曲线,为了便于分析,图 2 中还给出相同参数泡沫铝的准静态压缩曲线。从图 2 可见,泡沫铝的动态应力应变响应基本上可分为弹性、塑性坍塌和致密化三个阶段,在 900 s^{-1} 的低应变率下,由于子弹撞击速度较低,试样中应力不足以使泡沫铝产生致密化,因而压缩曲线不完整,只达到约 30%的应变。从图 2 中可见泡沫铝的动态压缩应力应变具有如下特征:(1)较高相对密度泡沫铝的应力曲线比较平滑,没有低密度泡沫铝的曲线所表现出的锯齿状波动^[7~9],这种差别正是两者不同的变形机制的反映;(2)动态下应力应变曲线均明显高于准静态的应力应变曲线,在塑性变形段泡沫铝的流动应力随应变的增加比静态下



图 1 通孔泡沫铝样品
Fig. 1 The open-cell Al foam specimen

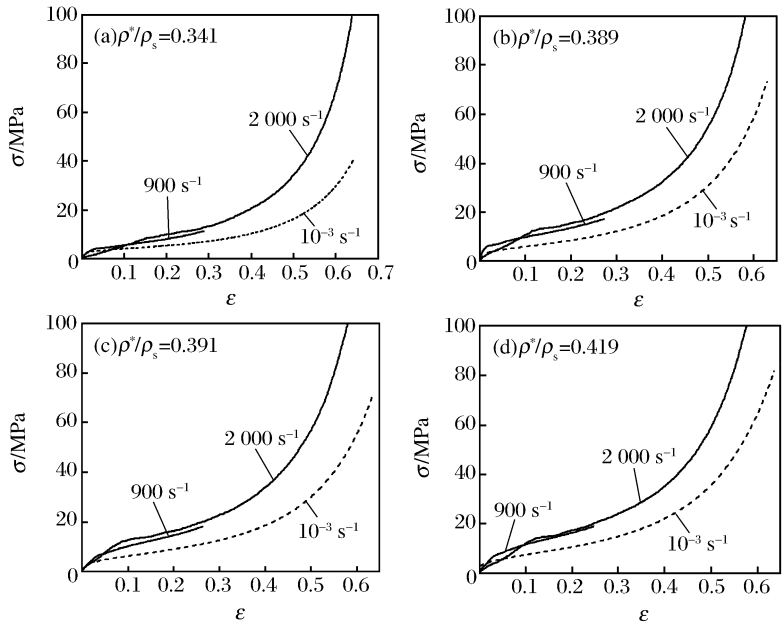


图 2 不同相对密度的通孔泡沫铝的动态应力应变曲线

Fig. 2 Dynamic stress-strain curves of the open-cell Al foams with different densities

上升快;(3)各种密度泡沫铝在动态下开始致密化时所对应的应力远高于准静态下的致密化应力值;(4)从图 2 中的各动态曲线上还可看出,当应变率较高时($2\,000\text{ s}^{-1}$),曲线上塑性段的前端均有一应力下降的波动过程,然后继续上升,分析认为这种反常现象与高速变形下泡沫铝中局部薄弱孔边的失稳有关,由于渗流法制备的泡沫铝中孔边厚度很不均匀(见图 1),且孔壁结构中存在较多铸造缺陷,因而应变速

度提高到一定程度后,在变形开始段造成这些薄弱部位发生结构失稳,但具体机制有待进一步探讨。

3.2 相对密度对泡沫铝动态压缩性能的影响

相对密度对泡沫铝动态力学性能的影响从图 2 也可看出。为了揭示相对密度对泡沫铝动态压缩力学性能的影响,对包括图 2 中泡沫铝在内的 14 个不同相对密度的泡沫铝试样分成两组,分别在 900 s^{-1} 和 $2\,000\text{ s}^{-1}$ 应变率下进行动态压缩,分别取各泡沫铝的应力应变曲线上对应于 20% 应变率下的流动应力进行分析,并借助静态下的 L. J. Gibson 的开孔泡沫力学模型^[10]

$$\sigma_{pl}^* / \sigma_s = C(\rho^* / \rho_s)^{1.5} \quad (2)$$

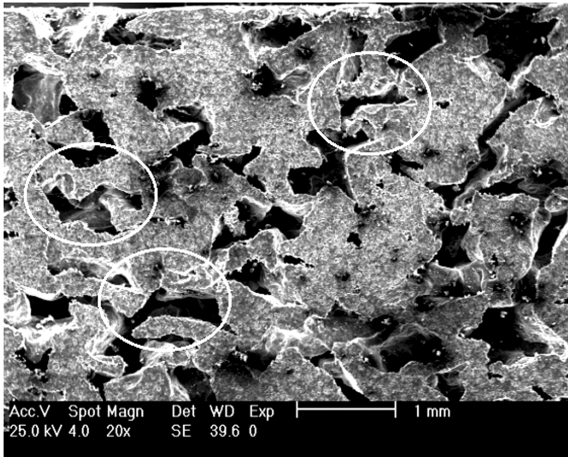
式中: σ_{pl}^* 和 σ_s 分别为泡沫铝坍塌强度和基体的屈服强度, C 为常数,作不同应变率下泡沫铝的归一化应力 (σ^* / σ_s) (工业纯铝基体屈服强度 $\sigma_s = 46\text{ MPa}$) 与相对密度的 1.5 次方幂的关系见图 3, 图 3 中直线为对数据点的线性拟合。可见, 动态下泡沫铝的归一化流动应力与相对密度的 1.5 次方仍近似有线性关系

$$\sigma^* / \sigma_s \approx K(\rho^* / \rho_s)^{1.5} \quad (3)$$

式中: K 为常数, 视不同应变率和基体性能由实验数据拟合而定, 此结果与刚性聚氨酯泡沫相似^[15]。

3.3 通孔泡沫铝动态压缩下的微观变形特征

(a) The pore size of 0.75 mm



(b) The pore size of 1.75 mm

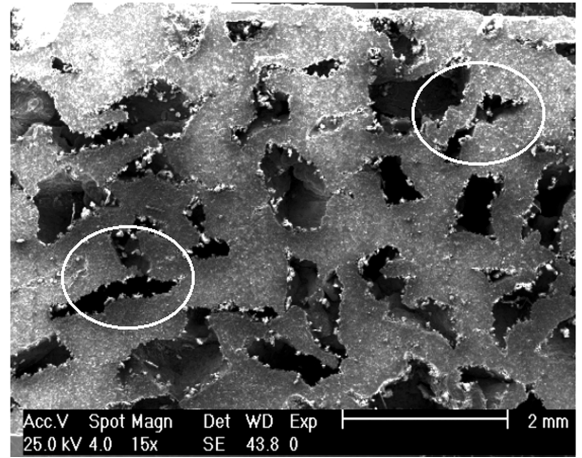


图 4 动态压缩后泡沫铝的变形组织

Fig. 4 The deformed structure of the open-cell Al foams after compression at the strain rate of 900 s^{-1}

为了进一步探讨通孔泡沫铝在动态压缩下的微观变形机制, 对应变率为 900 s^{-1} 、压缩应变量为 20% (约为塑性变形区一半的变形量) 的两种孔径泡沫铝试样, 用线切割将其沿压缩方向 (即轴向) 切开, 在扫描电镜下观察泡孔的变形特征, 结果见图 4, 图中的垂直方向即为试样的压缩方向。从整个试样高度上观察可以看到, 较高相对密度 (>0.3) 的泡沫铝动态压缩变形在试样的高度范围内均匀进行, 而不象低密度闭孔泡沫铝变形仅集中在局部坍塌带中^[8]。有的认为闭孔泡沫铝的变形从表面逐层坍塌向下传递, 正是这种坍塌变形造成了其应力应变曲线的上下波动^[16]。而本文中通孔泡沫铝具有宏观上均匀变形方式, 因此, 其应力应变曲线较平滑 (见图 2)。然而从微观上看, 动态下泡孔的变形方式与静态下相比发生了很大变化, 从图 4 可以看到大量泡孔发生横向伸展变形 (见图中的圆圈), 即使变形量只有约 20%, 泡孔横向伸展变形也比准静态下变形 40% 时明显。据此可以肯定, 动态压缩下, 通孔泡沫铝中泡孔采取了图 5 所示的横向伸展坍塌的变形机制, 即高速加载下抑制了比较容易的曲屈变形^[10]。而准静态下的变形机制, 则是首先从孔边薄弱处的弯曲变形开始, 然后造成孔边逐渐坍塌。另外, 从试样的宏观变形也间接说明这种泡孔的横向变形机制, 图 6 分别是高度为 8、20 mm 的动态压缩试样和准静态压缩试样在经历了应变基本相同的变形后的径向尺寸变化, 可见, 尽管动态试样的高度比静态试样高

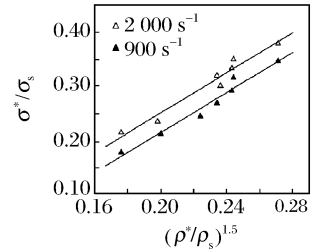


图 3 动态压缩下泡沫铝流动应力与相对密度的关系

Fig. 3 Variation of the dynamic flow stresses with relative densities of the open-cell Al foams

度小得多,但在与静态相同的压缩应变量下,动态试样的横向变形比静态试样的大,足见由横向伸展的微观变形机制导致了大量宏观侧向变形发生。

C. R. Callading 等^[17]用类似图 5 所示的四杆梁吸能结构分析了这种变形方式的力对变形速度的敏感性。这种结构在压缩变形时以梁的四个结点上形成的塑性铰转动向外横向伸展变形,随着变形速率的提高,梁的转动和结构

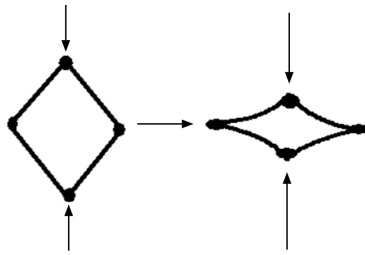


图 5 动态压缩后泡孔变形

Fig. 5 Dynamic deforming model of the open-cell Al foam

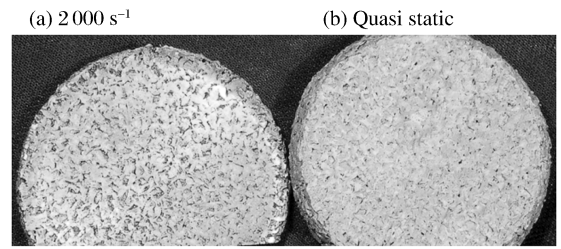


图 6 泡沫铝试样压缩后的尺寸变化

Fig. 6 Diameter changes of the Al foam samples after compression

结构横向伸展的惯性力增加,使轴向变形抗力显著上升,如果再加上杆材料本身屈服强度对应变率敏感性,则结构对变形速率的敏感性进一步提高。本文中开孔泡沫铝有相当多的泡孔在高速加载下发生了与 C. R. Callading 等^[17]的模型相似的横向伸展变形,在变形中还伴随着厚壁孔边的转动,增加了惯性阻力,这种微观惯性是引起本文中开孔泡沫铝应变率效应的重要因素之一。

4 结 论

(1) 渗流方法制备的通孔泡沫铝的动态压缩应力应变响应表现出弹性段、塑性坍塌段和致密化段的三阶段特征。(2) 相对密度对不同应变率下泡沫铝的动态力学性能有显著影响,通过对实验数据的拟合发现动态压缩下泡沫铝的流动应力与基体屈服强度的比值与相对密度的 1.5 次方成正比线性关系。(3) 动态压缩下,通孔泡沫铝表现明显的应变率效应,随应变率的提高,泡沫铝的流动应力上升。(4) 动态压缩下,通孔泡沫铝宏观上均匀变形;其微观变形机制以泡孔横向伸展坍塌为主,这种微结构变形的惯性效应是造成通孔泡沫铝应变率效应的重要因素。

参考文献:

- [1] CHENG He-fa, HUANG Xiao-mei, XUE Guo-xian, et al. Shock wave compression behavior of aluminum foam [J]. Journal of Central South University of Technology, 2003,10(4):333-337.
- [2] 程和法,黄笑梅,许玲. 泡沫铝镁合金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 of the compressive properties of the foamed Al-Mg alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2002,25(6):12-14.
- [3] Kanahashi H, Mukai T, Yamada Y, et al. Dynamic compression of an ultra-low density aluminum foam[J]. Materials Science and Engineering, 2000(A280):349-353.
- [4] 王斌,何得坪,舒光冀. 泡沫 Al 合金的压缩性能及能量吸收[J]. 金属学报,2000,36(10):1037-1040. WANG Bing, HE De-ping, SHU Guang-ji. The compressive properties and energy absorption of the foamed Al alloy[J]. Acta Metallurgical Sinica, 2000,36(10):1037-1040.
- [5] Beals J T, Thompson M S. Density gradient on aluminum foam compression behavior[J]. Journal of Materials Science, 1997(32):3595-3600.
- [6] Simone A E, Gibson L J. Effects of solid distribution on the stiffness and strength of metallic foams[J]. Acta Mater, 1998(46):2139-2150.
- [7] Deshpande V S, Fleck N A. High strain rate compressive behavior of aluminum foam alloy foams[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000(24):277-298.
- [8] Kathryn A D, James L J. High strain rate compression of closed-cell aluminum foams[J]. Materials Science and Engineering, 2000(A293):157-164.
- [9] Mukai T, Kanahashi H, Miyoshi T, et al. Experimental study of energy absorption in a closed-cell aluminum foam

- under dynamic loading[J]. *Scripa Materialia*, 1999(8):921—927.
- [10] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids: Structure and Properties*[M]. 2nd ed. UK: Cambridge University Press, 1997:205.
- [11] Tedesco J W, Ross C, Kufninen S T. Strain rate effects on the compressive strength of shock-mitigating foams[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1993(165):376—384.
- [12] Paul A, Ramamurty U. Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminum foam[J]. *Materials Science and Engineering*, 2000(A281):1—7.
- [13] 胡时胜,王恒,潘艺,等. 泡沫材料的应变率效应[J]. *爆炸与冲击*, 2003,23(1):13—17.
HU Shi-sheng, WANG Hen, PAN Yi, et al. The strain rate compressive behavior of aluminum alloy foam[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003,23(1):13—17.
- [14] 刘剑飞,王正道,胡时胜. 低阻抗多孔介质材料的 SHPB 实验技术[J]. *实验力学*, 1998,13(2):218—223.
LIU Jian-fei, WANG Zheng-dao, HU Shi-sheng. The SHPB experiment technology for low wave impedance porous materials[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1998,13(2):218—223.
- [15] 胡时胜,刘建飞. 硬质聚氨酯泡沫塑料本构关系的研究[J]. *力学学报*, 1998,30(2):151—155.
HU Shi-sheng, LIU Jian-fei. The study of the constitutive relation of foamed rigid polyurethane[J]. *Acta Mecha Sinica*, 1998,30(2):151—155.
- [16] Meguin S A, Cheon S S, El-Abbasi N. FE modeling of deformation localization in metallic foams[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2002(38):631—643.
- [17] Calladine C R, English R W. Strain and inertia effects in the collapse of two types of energy-absorbing structure[J]. *International Journal of Mechanical Science*, 1984(11/12):689—701.

The dynamic compressive behaviors of an open-cell aluminum foam

CHENG He-fa^{1*}, HUANG Xiao-mei¹, WANG Qiang¹,

TIAN Jie², HAN Fu-sheng³

(1. *School of Material Science and Engineering of Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;*

2. *Department of Mechanics and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;*

3. *Laboratory of Internal Friction and Defects in Solids, Institute of Solid State Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China)*

Abstract: The dynamic compressive experiments were conducted on the open-cell aluminum foams prepared by infiltration process using the SHPB. The dynamic response and strain rate dependence of the aluminum foams with the relative density of 0.341~0.419 were investigated in the strain rate range from 10^{-3} to $2\,000\text{ s}^{-1}$, and the deforming characteristic of the foams was observed by using the scanning electron microscope(SEM). Experimental results show that the flow stresses of the aluminum foams increase with increasing strain rate, demonstrating a distinct strain rate effect in the open-cell aluminum foams. Observed results with SEM reveal a homogeneously macroscopic deforming mode in the dynamic compression of the open-cell aluminum foam. However, the microscopic deformation of the foams is adopted by the transversal stretch of the cells.

Key words: solid mechanics; strain rate effect; dynamic compression; open cell aluminum foam

* Corresponding author: CHENG He-fa

E-mail address: cheng12505@yahoo.com.cn

Telephone: 0551-2901362