

① 1037-1040

泡沫 Al 合金的压缩性能及其能量吸收 *

王斌 何德坪 舒光冀
(东南大学材料科学与工程系, 南京 210096)

TG146.21

摘要 研究了泡沫纯铝和泡沫 AlSi7Mg0.45 在单向压缩条件下的应力-应变 ($\sigma-\epsilon$) 曲线, 分析了它们的变形行为, 并讨论了其能量吸收和能量吸收效率。结果表明: 泡沫纯铝与泡沫 Al 合金的 $\sigma-\epsilon$ 曲线均由弹性变形段、平缓段和紧实段组成; 在压缩过程中, 泡沫纯铝的骨架变形以弯曲为主, 泡沫 AlSi7Mg0.45 的骨架变形主要由局部断裂产生。在相同孔隙率下, 泡沫 AlSi7Mg0.45 的能量吸收大于泡沫纯铝; 能量吸收效率与应变有关, 存在一个峰值。

关键词 泡沫 Al 合金, 应力-应变曲线, 能量吸收, 能量吸收效率, 孔隙率

中图分类号 TG146.21

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2000)10-1037-04

COMPRESSIVE PROPERTY AND ENERGY-ABSORPTION OF FOAMED Al ALLOY

泡沫铝合金
压缩性能

WANG Bin, HE Deping, SHU Guangji
Department of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096
Correspondent: WANG Bin, engineer, Tel: (025)3717785, Fax: (025)3328694.
E-mail: wangbin66@netease.com

Manuscript received 1999-09-04, in revised form 2000-06-29

ABSTRACT The compressive stress-strain curves of foamed pure Al and foamed AlSi7Mg0.45 were studied, and the corresponding deformation behaviors, energy absorption capacity and energy absorption efficiency were discussed. The results show that the stress-strain curves of foamed pure Al and foamed Al alloy consist of elasticity, collapse plateau and densification segments; in compressive procession the mainly way of the framework deformation is its bending for foamed pure Al and is rupturing for foamed AlSi7Mg0.45. Under the condition of the same porosity the energy absorption capacity of foamed AlSi7Mg0.45 is bigger than that of foamed pure Al and the energy absorption efficiency related to strain has a peak value.

KEY WORDS foamed Al alloy, stress-strain curve, energy absorption capacity, energy absorption efficiency, porosity

由金属骨架和孔隙所构成的泡沫 Al 合金受到冲击时, 应变强烈滞后于应力, 在压缩的应力-应变 ($\sigma-\epsilon$) 曲线上有一很宽的平台区, 在较大的应变范围内应力可保持不变, 将外加能量转化为材料形变所做的功, 从而具有良好的吸收冲击能量的性能。

研究泡沫 Al 合金压缩性能的意义在于: (1) 压缩是主要的使用应力状态, 可以获得在单向压缩条件下的力学性能; (2) 从压缩过程中实测的 $\sigma-\epsilon$ 曲线可以大致判断泡沫 Al 合金的能量吸收能力。

本文在单向压缩恒应变速率条件下研究泡沫 Al 合金的压缩 $\sigma-\epsilon$ 曲线, 在此基础上研究能量吸收、能量吸收效率及其影响因素, 并与泡沫纯铝进行了比较。

1 实验方法

在专用设备上, 调节工艺参数获得孔径相似、不同孔隙率的泡沫纯铝和泡沫 Al 合金 (AlSi7Mg0.45, 质量分数, %), 采用线切割加工, 以保证上下端面的平整以及端面与试样轴线的垂直度, 压缩试样的尺寸为直径 100 mm×25 mm。

在万能压缩试验机上, 以 5 mm/min 的变形速率进行单向压缩, 将加载量和压缩位移通过传感器及电阻应变仪, 输入到 X-Y 函数记录仪, 自动记录加载量-位移曲线, 处理后得到压缩 $\sigma-\epsilon$ 曲线。

* 国家自然科学基金资助项目 19982001

收到初稿日期: 1999-09-04, 收到修改稿日期: 2000-06-29

作者简介: 王斌, 男, 1966 年生, 工程师, 博士, 现在江苏淮海投资有限公司工作, 南京 210005

2 实验结果和分析

2.1 应力 - 应变 (σ - ϵ) 曲线

图 1a,b 是直接测出的泡沫纯铝和泡沫 AlSi7Mg0.45 试样在单向压缩过程中的 σ - ϵ 曲线. 由图可见: (1) 在孔隙率 $q_{initial}$ 值相近的条件下, 达到相同应变时泡沫 AlSi7Mg0.45 的压缩应力较泡沫纯铝大, 这说明在孔隙率相同的前提下, 泡沫 Al 合金的骨架强度较大. 因此在到达相同的压缩应变时, 可承受较大的压缩应力; (2) 泡沫纯铝和泡沫 Al 合金的 σ - ϵ 曲线均由弹性变形段、平缓段和紧实段三部分组成 [1].

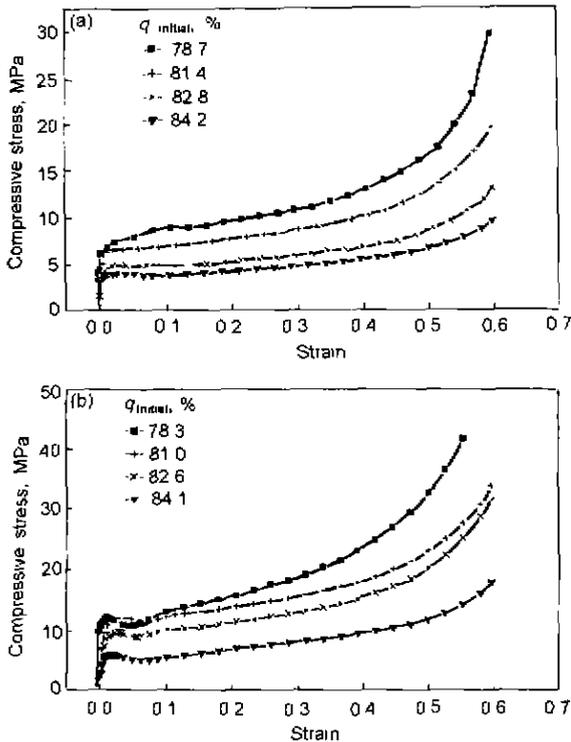


图 1 泡沫纯铝和泡沫 AlSi7Mg0.45 压缩时的应力 - 应变曲线
Fig.1 Stress-strain (σ - ϵ) curves of foamed pure Al (a) and foamed AlSi7Mg0.45 (b) in compression processing under different porosities ($q_{initial}$)

2.1.1 弹性变形段 泡沫金属结构为多边形骨架和孔洞. 骨架是承受压缩应力的主要部分. 当泡沫金属受到外界载荷时, 骨架首先发生弹性弯曲, 如图 2 所示.

弹性变形段存在于较小的应变范围内, 为弹性应变. 当外力卸载后, 泡沫金属即可恢复原状, 弹性变形段的斜率为泡沫金属的弹性模量.

图 3 是泡沫纯铝和泡沫 AlSi7Mg0.45 的弹性模量 E_f 随试样孔隙率变化的曲线. 由图可知, 两种材料的 E_f 值均随试样孔隙率的增加而减小; 在孔隙率相近时, 泡沫 AlSi7Mg0.45 的 E_f 值高于泡沫纯铝的 E_f 值.

2.1.2 平缓段 当压缩应力达到一定值时, 泡沫

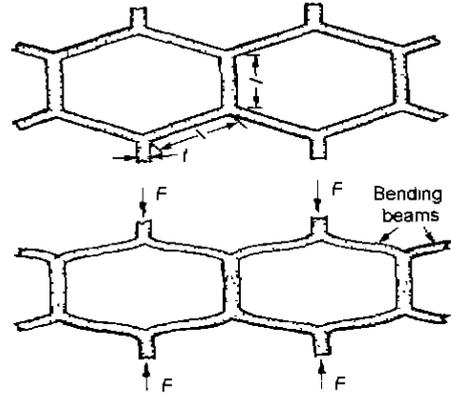


图 2 泡沫 AlSi7Mg0.45 压缩时的弹性变形模型 [2,3]

Fig.2 Elasticity deformation model of foamed AlSi7Mg0.45 in compression processing [2,3]

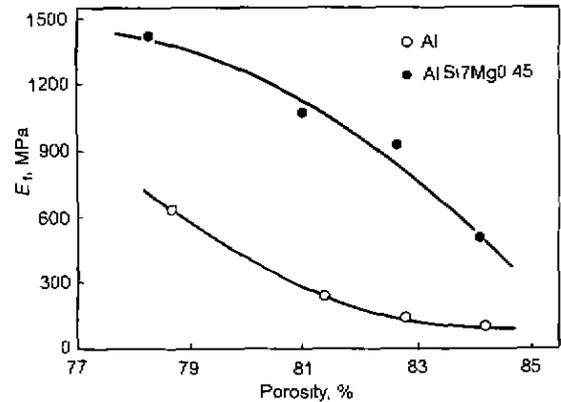


图 3 不同孔隙率下泡沫纯铝和泡沫 AlSi7Mg0.45 的弹性模量
Fig.3 Elasticity modulus (E_f) of foamed pure Al and foamed AlSi7Mg0.45 with different porosities

Al 的骨架部分承受了相当大的应力而发生变形. 部分应力在变形过程中消耗. 随后, 应变逐渐增大而应力却很少增加. 在 σ - ϵ 曲线上表现为平缓段.

如果泡沫金属的骨架为塑性材料, 在压缩过程中骨架表现为塑性行为. 随着外加载荷的增加, 使得泡沫金属断面上骨架承受的力超过其屈服强度时, 则发生塑性变形, 如图 4a 所示.

如果泡沫金属的骨架为脆性材料, 在压缩过程中骨架表现为脆性行为. 随着外加载荷的增加, 使得泡沫金属断面上骨架所承受的力超过其断裂强度时, 便发生脆性断裂, 如图 4b 所示.

若以应变为 2% 时 (由 σ - ϵ 曲线可知, 一般在应变为 2% 时由弹性变形段进入到平缓段) 发生的应力值作为泡沫金属的屈服强度 σ_s 值 [4,5], 则两种泡沫材料的 σ_s 值随孔隙率的变化见图 5. 由图可知, σ_s 随孔隙率的增加而减小; 孔隙率值相近时, 泡沫 AlSi7Mg0.45 的 σ_s 值高于泡沫纯铝的 σ_s 值. 这说明泡沫 Al 的屈服强度与基体金

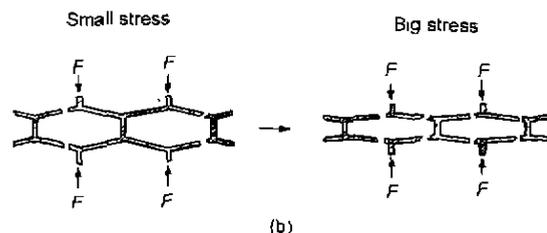
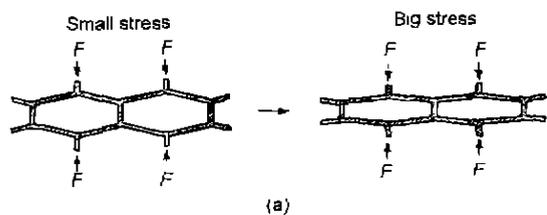


图 4 压缩过程中塑性及脆性材料的变形模型

Fig.4 Deformation models of plasticity of material^[2,3] (a) and brittle material^[4,5] (b) in compression processing

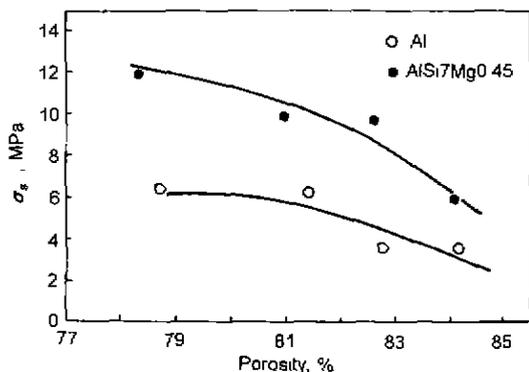


图 5 泡沫纯 Al 与泡沫 Al 合金的屈服强度和孔隙率的关系
Fig.5 Relationship between yield strength (σ_s) and porosity of foamed pure Al and foamed AlSi7Mg0.45

属相似。

2.1.3 紧实段 随着施加在泡沫金属试样上的应力的增加, 其骨架部分逐渐发生形变, 当应力达到一定值时, 骨架之间的孔洞将被压实 (如图 6 所示), 在 $\sigma-\epsilon$ 曲线上则进入到紧实段。

由前所述, 由于纯铝及 AlSi7Mg0.45 力学性能的差异, 导致其骨架部分在压缩过程中的表现不相同。泡沫纯铝和泡沫 Al 合金在压缩过程中, 当承受较小的压缩应力时, 压头处的骨架部分首先发生弹性变形, 在 $\sigma-\epsilon$ 曲线上表现为弹性变形段。对于泡沫纯铝, 其骨架部分呈现较多的塑性, 随着压缩应力的增大, 超过其发生弯曲变形的临界应力时, 压头处的骨架部分发生塑性弯曲变形, 随着压缩应力的继续增大, 部分骨架也发生断裂变形, 压缩应力通过已变形的骨架部分逐渐传递给未变形的骨架部分, 泡沫纯铝的骨架逐渐从压头处开始向远离压头的方向产生

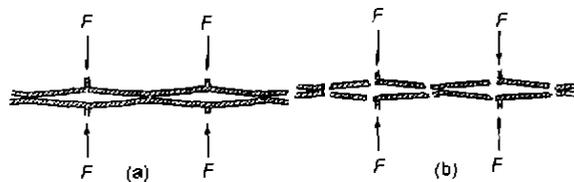


图 6 泡沫材料压缩时的紧实模型

Fig.6 Tightness models of foamed Materials in compression processing
(a) plasticity material
(b) brittle material

变形, 在已变形的区域以弯曲变形为主, 在 $\sigma-\epsilon$ 曲线上表现为平缓段; 对于泡沫铝合金, 其骨架部分呈现较多的脆性, 随着压缩应力的增大, 骨架发生弯曲变形, 当压缩应力超过骨架发生断裂的临界应力时, 骨架部分发生断裂, 同时压缩应力得到释放, 应变继续增大而应力却下降, 在 $\sigma-\epsilon$ 曲线上的这种应力下降显示出泡沫骨架微裂纹形成所造成的应力松弛效应已经大于塑性应变硬化效应, 随着压缩应力的继续增大, 压缩应力通过已发生变形的骨架部分传给未变形的骨架部分, 使得从压头处开始向远离压力头的方向, 泡沫铝合金的骨架逐渐产生变形, 在靠近压头的附近, 骨架的总体变形主要由局部断裂产生, 在远离压头处, 则以弯曲变形为主, 在 $\sigma-\epsilon$ 曲线上表现为平缓段。当泡沫试样承受的应力达到一定值时, 在整个压缩方向上骨架部分均发生变形, 随着压缩应力的继续增大, 骨架之间的孔洞被压实, 在 $\sigma-\epsilon$ 曲线上则进入紧实段。

2.2 能量吸收及其效率

2.2.1 能量吸收 在压缩过程中, 泡沫材料的 $\sigma-\epsilon$ 曲线与应变轴之间所包含的面积就是其吸收能量 C ^[6,7]。

$$C = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \tag{1}$$

图 7a,b 分别为两种泡沫 Al 在压缩过程中不同应变量的能量吸收与孔隙率的变化曲线。由图可知, 在相同应变的情况下, 泡沫 Al 的能量吸收随着试样孔隙率的提高而下降; 相同孔隙率时, 泡沫 AlSi7Mg0.45 的能量吸收大于泡沫纯铝的能量吸收。

泡沫金属内部呈三维网络结构, 孔洞之间由基体金属骨架分隔。如果试样的孔隙率高, 其骨架的厚度小, 则强度低; 孔隙率低, 其骨架的厚度大, 则强度高。在单向压缩过程中, 孔隙率高的泡沫金属, 其骨架厚度小、强度低, 容易变形, 在相同压缩比下, 其压缩强度低, 吸收能量少; 反之, 则压缩强度高, 吸收能量多。而相对于泡沫纯铝来说, 泡沫 AlSi7Mg0.45 基体的强度较大, 其骨架的强度大, 使得在相同的变形量下, 其压缩应力较大, 吸收的能量较多。

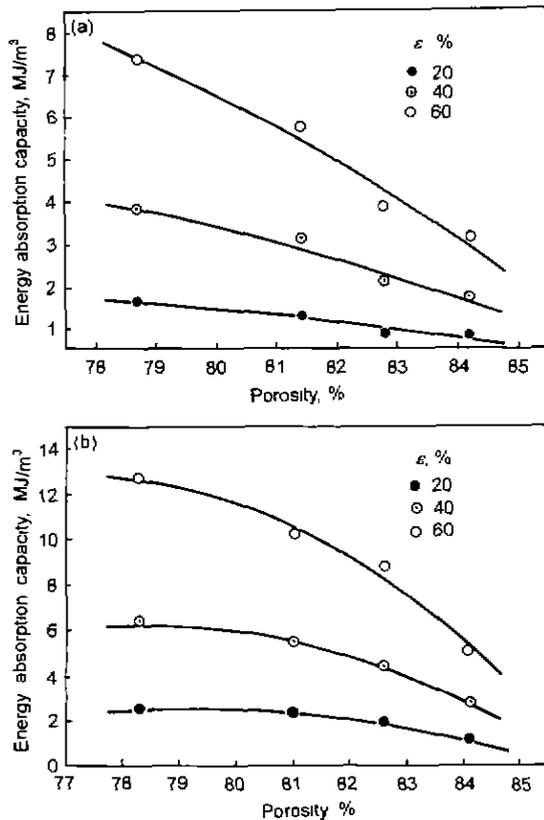


图7 泡沫纯铝及泡沫 Al 合金的能量吸收与孔隙率的关系
Fig.7 Relationships between energy absorption and porosity of foamed pure Al (a) and foamed AlSi7Mg0.45 (b)

2.2.2 能量吸收效率 能量吸收效率就是在相同的应变时, 实际泡沫金属的能量吸收与理想泡沫金属的能量吸收的比值, 记为 E ^[7].

$$E = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon / (\sigma \epsilon)$$

图 8 是两种泡沫 Al 的能量吸收效率与压缩应变之间的拟合曲线. 由图可知, 随着应变的增加能量吸收效率先增大后减小, 表明能量吸收效率存在一个峰值: 泡沫 AlSi7Mg0.45 与泡沫纯铝的能量吸收效率峰值较为接近, 但其峰宽较泡沫纯铝窄; 泡沫纯铝的能量吸收效率峰所在的应变值较泡沫 AlSi7Mg0.45 的小. 另外, 能量吸收效率与试样的孔隙率在小范围内的变化无明显联系.

高的能量吸收效率表现在 σ - ϵ 曲线上, 即曲线的平缓段较长. 由图 1 可见, 在泡沫纯铝 σ - ϵ 曲线上平缓段较长, 因此其总的能量吸收效率 (能量吸收效率曲线与 x 轴之间的面积) 较泡沫 Al 合金高; 而泡沫 AlSi7Mg0.45 骨架微裂纹形成所造成的应力松弛效应已经大于塑性应变硬化效应, 使得此点附近能量吸收较少, 导致能量吸收效率减小.

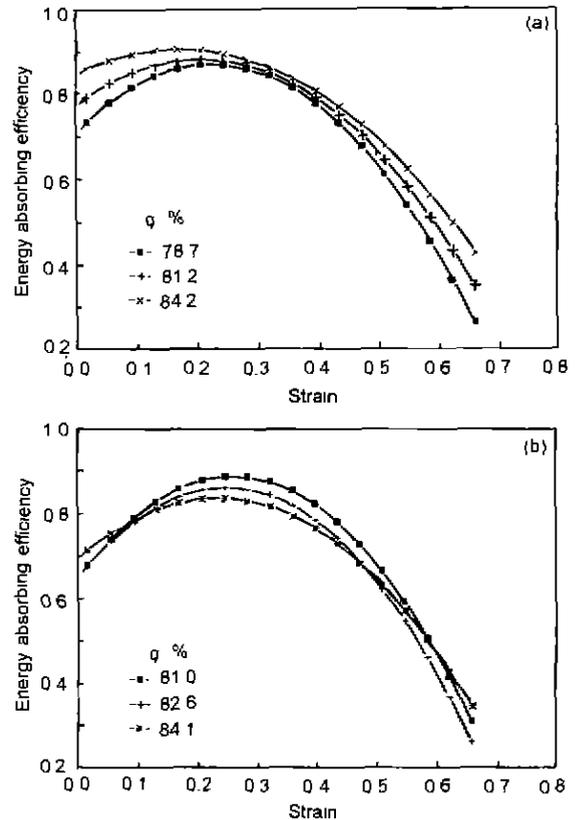


图8 泡沫纯铝及泡沫 Al 合金的能量吸收效率

Fig.8 The energy absorption efficiency of foamed pure Al (a) and foamed AlSi7Mg0.45 (b)

3 结论

- (1) 在单向压缩条件下, 泡沫纯铝和泡沫 Al 合金的 σ - ϵ 曲线均由弹性变形段、平缓段和紧实段组成.
- (2) 在孔隙率相近的前提下, 泡沫 Al 合金的弹性模量和屈服强度大于泡沫纯铝的弹性模量与屈服强度.
- (3) 在非弹性压缩过程中, 泡沫纯铝的骨架变形以弯曲为主, 泡沫 Al 合金的骨架变形主要由局部断裂产生.
- (4) 在相同应变的情况下, 两种泡沫材料的能量吸收随着试样孔隙率的增大而下降; 相同孔隙率时, 泡沫 Al 合金的能量吸收大于泡沫纯铝的能量吸收.
- (5) 能量吸收效率与应变的关系存在一个峰值.

参考文献

- [1] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids: Structure and Properties*. 2nd ed., Cambridge University Press, 1999. 176
- [2] Gibson L J, Ashby M F, Schajer G S, Robertson C I. *Proc R Soc London*, 1982; 382A: 25
- [3] Gibson L J, Ashby M F. *Proc R Soc London*, 1982; 382A: 43
- [4] Rusch K C. *J Appl Polym Sci*, 1970; 14: 1263
- [5] McIntyre A, Anderton G E. *Polymer*, 1979; 20: 247
- [6] Gent A N, Rusch K C. *J Cell Plast*, 1966; 2: 46
- [7] Miltz J, Gruenbaum G. *Polym Eng Sci*, 1981; 21: 1010