

文章编号: 1001-4888(2001)04-0438-06

泡沫铝的单向力学行为*

王 曦, 虞吉林

(中国科学技术大学 材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230026)

摘要: 本文对不同孔径的开孔泡沫铝材料的单向拉伸性能和单向压缩性能进行了研究, 揭示了泡沫铝材料的变形机理, 并且发现相对密度不是确定材料力学属性的唯一参数, 孔径大小对材料的力学性能也有一定的影响。基于实验数据, 我们讨论了材料的宏观力学性能和微观结构的联系, 并利用 Ramberg-Osgood 模型描述了材料的单轴拉伸一维应力应变关系。

关键词: 泡沫铝; 应力应变曲线; 微结构; 孔径尺寸; Ramberg-Osgood 模型

中图分类号: TG146.2⁺1 **文献标识码:** A

1 引言

很多年来, 自然界中大量存在的疏松多孔材料以其优异的力学性能和多种应用功能引起许多力学家、材料学家和工程师的广泛兴趣和不懈的探索研究^[1-3]。泡沫金属材料作为多孔金属材料的一个分支, 已有 40 多年的发展历史。So snik 于 1948 年最早提出利用汞在熔融铝中气化而制取泡沫铝合金的想法。Ellist 发展了这一想法, 并于 1956 年成功地制造了泡沫铝。

泡沫金属材料作为一种新型工程材料, 在各种军用、民用的工程结构中均展现出广泛的应用前景。特别是近几年来, 泡沫金属材料的生产研制技术已经日趋成熟, 加速了人们对泡沫金属材料应用研究的步伐。如日本几年前已将泡沫铝板用于高速公路两侧的吸音墙, 德国大众汽车公司也将泡沫铝用于汽车作为吸能装置。因此, 国际上不少研究机构把泡沫金属作为 21 世纪新材料研究的一个专门的热点。例如, 美国陆军研究办公室将泡沫金属材料等多孔材料列为 21 世纪材料研究的新趋势之一。同时, 孔洞材料力学在国际力学界已成为具有明确定义的力学研究领域。

我们先总结一下开孔泡沫材料的理论分析结果, 给出泡沫材料的力学参数和相对密度 ρ^*/ρ_s 的关系式。由于泡沫材料胞体的几何形状过于复杂, 无法像蜂窝材料那样精确分析, 通

* 收稿日期: 2001-03-11; 修订日期: 2001-10-28

基金项目: 国家自然科学基金 (批准号: 10072059) 资助的课题

作者简介: 王曦 (1976-), 男, 硕士生, 现为美国哈佛大学博士生

常采用量纲分析的方法,也就是选取某种几何形状的胞体模型,分析其性质与相对密度、基体材料的关系。这种关系只是按照量级估计的,表达式中保留有一待定常数,通常需要通过实验测定。实践证明,这种量纲分析的结果只依赖于假定的变形模式,对选取的胞体模型不敏感。对于开孔各向同性泡沫材料,Gibson和Ashby^[1]采用图1所示的正立方体模型。假设弹性变形模式主要是棱杆的弯曲。根据初等梁理论计算变形量,并注意到 $\rho^*/\rho_s \propto (t/d)^2$,可以得到开孔泡沫材料的模量 E^* 为

$$E^*/E_s = C_1(\rho^*/\rho_s)^2 \quad (1)$$

当应变较大时(如超过5%或某个更小的值)时,泡沫材料不再保持线弹性。对于密度较高的弹塑性泡沫,由于棱杆较厚,在发生可能的屈曲之前材料已经进入塑性,于是其失效主要由某种塑性坍塌机构所控制。这时,塑性极限载荷与基体材料的屈服应力有关,开孔泡沫的极限载荷 σ_{TS}^* 可表示为

$$\sigma_{TS}^*/\sigma_{ys} = C_2(\rho^*/\rho_s)^{3/2} \quad (2)$$

其中 C_1, C_2 为常数。通过和大量实验数据比较得出 $C_1 = 1, C_2 = 0.3$ 。

从上面可以看出,相对密度是决定泡沫材料力学属性的一个很重要的参数。本文研究的泡沫铝材料微观结构的扫描电镜照片如图2所示。从照片上我们可以看到,材料的微结构和理论分析的开孔微结构(图1)有明显的差别。胞棱并不是规则的棱柱,而是无序的固体集合体。而且在这些集合体中还有一些孔洞和大量的裂纹。这些微结构的缺陷肯定会对材料的力学性能造成影响。所以泡沫材料胞体的几何性质也是很重要的一个因素,研究孔径大小等胞体几何性质对材料性质的影响对全面了解泡沫材料的力学性质有很重要的意义。本文对两种不同孔径的开孔泡沫铝材料的单向拉伸力学性能和五种不同孔径的开孔泡沫铝材料的单向压缩性能进行了研究,揭示了泡沫铝材料的变形机理,并发现孔隙率不是唯一的确定材料力学属性的参数,孔径大小对材料的力学性能也有一定的影响。基于实验数据,我们讨论了材料的宏观力学性能和微观结构的联系,并利用Ramberg-Osgood模型描述了材料的拉伸状态的一维应力应变关系。

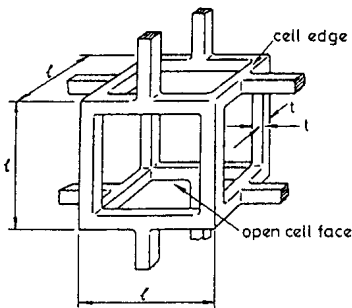


图1 Gibson-Ashby模型^[1]



图2 泡沫铝微观结构SEM照片

2 试件制备和实验方法

实验中泡沫铝材料采用渗流法制造,这种方法是先把筛好的均匀尺寸固体颗粒放置于铸模之内,在其周围浇铸金属,然后把固体颗粒除去;或向铸液中添加固体颗粒,待金属凝固后将

固体颗粒除去,就剩下多孔的泡沫金属,其平均孔径近似等于固体颗粒的平均直径。所加的固体颗粒一般是可溶的,但热阻很大,如NaCl加入的固体颗粒也可以是易被压缩的疏松的无机材料。由于表面张力的作用,金属有时不能进入到颗粒周围的缝隙中,在这种情况下,就需要在熔体表面施加压力(如使用活塞)或使模具具有适当的负压(如连接真空泵)才能有利于金属流动而达到浇铸的目的。这种方法已用于Al, Mg, Zn, Pb, Sn及多种合金的泡沫金属的制备。

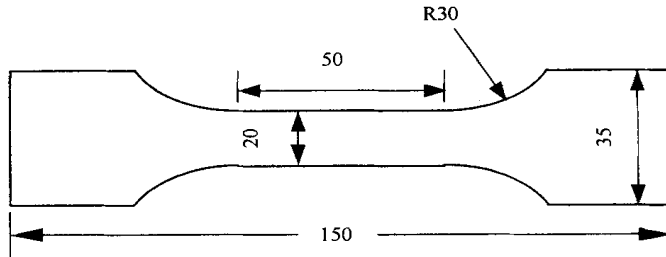


图3 拉伸试件几何尺寸,单位:mm,试件厚度10mm

本文中所用泡沫铝材料的密度为 1.1 g/cm^3 ,相对密度为0.4,材料及其孔径数据均由中国科学院固体物理研究所提供。拉伸试件的几何形状如图3所示,试件从 $500 \times 500 \times 10 \text{ mm}^3$ 的板状材料上按照图3的尺寸线切割得到;压缩试件的几何尺寸为 $30 \times 30 \times 40 \text{ mm}^3$ 。实验在MTS材料实验机上进行,加载速度为 0.02 mm/s 。

3 实验结果分析和讨论

3.1 单向拉伸行为

相对密度为0.4的两种孔洞尺寸的开孔泡沫铝的拉伸曲线如图4所示。从曲线上可以看出,材料在破坏之前没有明显的屈服点。对于这种连续屈服的材料,其 $\sigma \leq \sigma_{rs}$ 时的应力应变曲线可以用Ramberg-Osgood模型^[4]来描述:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \left(\frac{\sigma_0}{E} \right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^M \quad (3)$$

其中 σ_0 是参考应力, E 是初始弹性模量, M 是应力指数,表征材料屈服后的硬化行为, α 是常数,通常取为3/7。对式(3)移项同时取对数可以得到应力指数的表达式:

$$\ln \left[\epsilon - \frac{\sigma}{E} \right] = M \ln \sigma + \ln \left[\frac{\alpha}{E} \right] - (M - 1) \ln \sigma_0 \quad (4)$$

利用实验测定的 $\sigma - \epsilon$ 曲线和初始弹性模量 E 可在 $\ln(\epsilon - \sigma/E) \sim \ln \sigma$ 坐标上拟合出直线,利用其斜率和截距即可获得 M 和 σ_0 。图5是Ramberg-Osgood模型一维本构方程曲线与实验数据的比较,可以看到它与实验结果吻合得很好。

两种孔径的泡沫铝的拉伸强度和初始弹性模量列于表1。从中可以看出,孔径大小对材料的拉伸性能有一定影响。相对密度相同时,孔径小的材料拉伸强度和弹性模量比孔径大的高。

表 1 材料拉伸强度和初始弹性模量

材料相对密度	0.4	0.4
材料平均孔径大小(mm)	0.5	1.0
拉伸强度 σ_{TS}^* (MPa)	6.401	6.064
初始弹性模量 E^* (MPa)	1517.8	1179.6

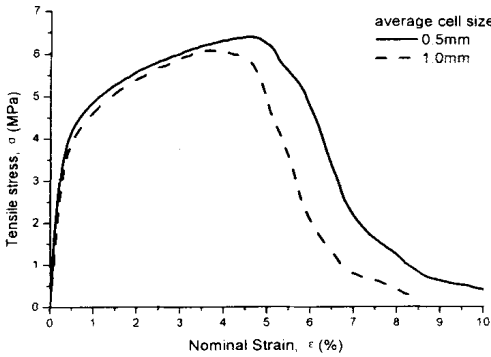


图 4 拉伸应力应变曲线

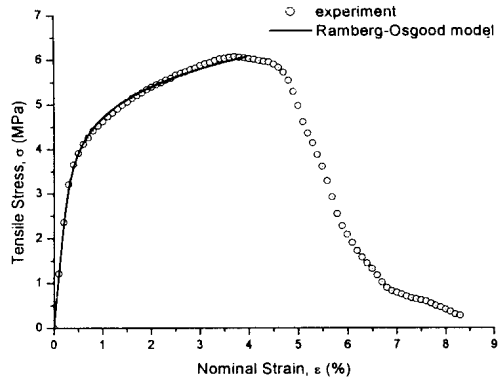


图 5 Ramberg-Osgood 模型与实验曲线的比较

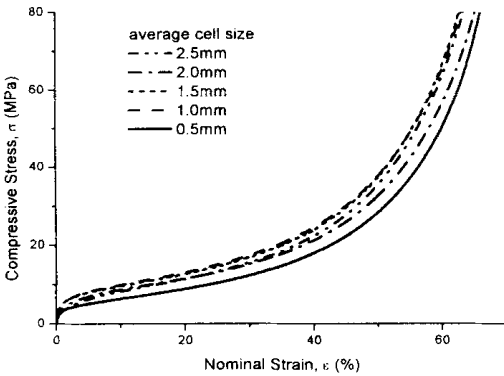


图 6 压缩应力应变曲线

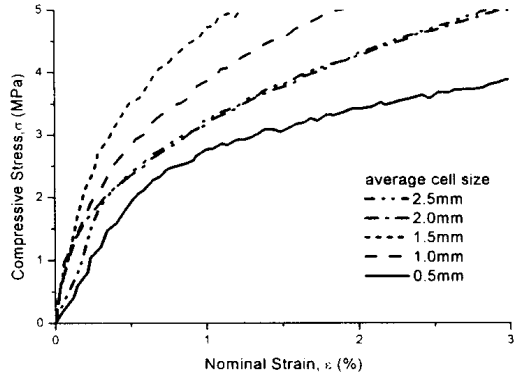


图 7 压缩应力应变曲线($\epsilon < 3\%$)

3.2 单向压缩行为

我们对 5 种相对密度同为 0.4, 但是具有不同孔径的开孔泡沫铝的压缩行为进行了研究。5 种材料的压缩应力应变曲线和 $\epsilon < 3\%$ 范围内的压缩曲线分别如图 6 和图 7 所示。从图 6 中可以看出压缩曲线基本上分为三个阶段: 第一阶段: 弹性阶段, 这个阶段很短, 应变只有 0.2%。第二阶段: 塑性平台阶段, 这个阶段跨度很大, 应变一直达到 50% 以上。在这个阶段, 随着应变的增大, 载荷上升得很缓慢。第三阶段: 密实阶段, 这个阶段表现为载荷随着应变增大迅速上升。孔径不同的泡沫铝的压缩曲线形状基本相似, 不同主要表现在塑性平台的高度上, 从图 6 中我们可以看到, 孔径为 1.0mm 和 1.5mm 的泡沫铝的塑性平台较高, 孔径为 2.0mm 和 2.5mm 的其次, 孔径为 0.5mm 的最低。可见孔径大小对塑性平台的高度有一定的影响。孔径大小

对材料压缩弹性模量的影响如图 8 所示 其中, 孔径为 1.5mm 的试件的模量最大, 孔径为 0.5 mm 和 2.0mm 的试件的模量都比较低 与压缩曲线三个阶段相对应的实验照片如图 9 所示 (a) 是弹性阶段, (b)~(e) 是塑性平台阶段, (f) 是密实阶段 从图中可以看出, 试件两端的泡沫先发生坍塌, 而中间的泡沫结构基本保持原状, 压缩变形不是很明显 随着变形继续, 坍塌由两端向中间扩展, 中间的泡沫受到挤压向两边膨胀, 知道材料进入密实阶段

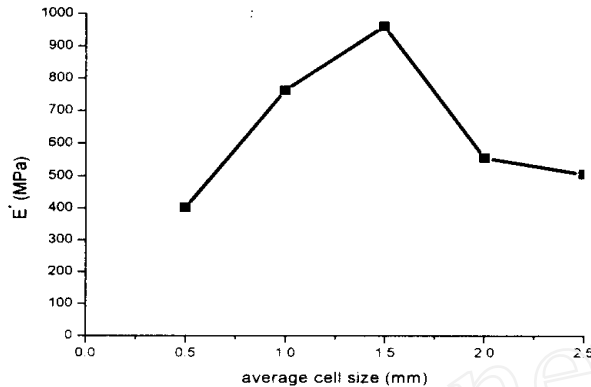


图 8 孔径对压缩模量的影响

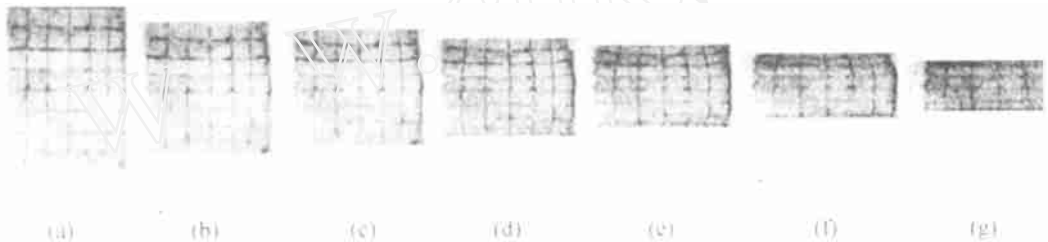


图 9 泡沫铝压缩过程, 应变为: (a) 2%; (b) 20%; (c) 30%; (d) 40%; (e) 50%; (f) 60%; (g) 70%

3.3 微结构缺陷对材料力学性能的影响

为了精确评价泡沫铝的力学属性, 给出可靠的泡沫元胞胞棱的材料力学参数是很重要的 我们实验中所用的泡沫铝基体材料参数为 $\rho_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$, $E_s = 70 \text{ GPa}$, $\sigma_{ys} = 70 \text{ MPa}$ 我们基于这些数据对泡沫铝的力学性能作出评价 按照式 (1)、(2) 对相对密度为 0.4 的泡沫铝材料的力学性能进行计算, 发现实验的模量和强度都比 Gibson 和 Ashby 分析得到的要低 造成这种结果的原因主要是图 2 所示的微结构和理论分析的开孔微结构 (图 1) 有明显的差别: 胞棱并不是规则的棱柱, 而是无序的固体集合体, 而且在这些胞棱中还有一些孔洞和大量的裂纹 这些微结构的缺陷肯定会对材料的力学性能造成影响 与理想微结构相比, 实际材料中的胞棱截面是变化的, 固体质量集中于节点附近, 这导致实际泡沫铝材料的弹性模量大大降低 另一方面, 实际微结构的不均匀性和大量微缺陷的存在必然导致变形局部化和损伤发展, 从而使破坏过程提前发生

4 结论

(1) 拉伸状态下, 泡沫铝几乎是在刚开始加载即发生连续屈服, 整个拉伸行为表现为半脆

性 通过对实验结果的分析, 利用 Ramberg-Osgood 模型, 建立了相应的一维弹塑性本构方程, 和实验结果吻合得很好。

(2) 初始拉伸弹性模量和拉伸强度随着相对密度的提高非线性增加 孔洞尺寸对这些参数有一定的影响, 孔径大的泡沫铝的模量和强度都相对较高

(3) 压缩状态下, 曲线分为三个阶段: 弹性区, 塑性平台区, 密实区 孔径大小对压缩弹性模量和压缩塑性平台的大小都有一定的影响, 可见相对密度并不是决定材料属性的唯一参数 对于确定的相对密度, 可以找到一个合适的孔径大小, 使材料的力学性能得到较大提高

(4) 实验测得的模量和强度都比 Gibson 和 Ashby 分析得到的要低, 原因是生产过程中产生的泡沫微结构中的缺陷造成了材料力学性能的显著下降 可以期望, 通过改进制备工艺, 生产出胞棱截面规则、微结构均匀而缺陷少的泡沫铝, 其强度、模量等力学性能将大大提高, 应用潜力可得到充分发挥

致谢: 本文实验中所用的泡沫铝材料是由中科院合肥固体物理研究所内耗与固体缺陷开放研究实验室的韩福生研究员提供的, 在此表示感谢

参考文献:

- [1] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids Structure and Properties [M]. Oxford, Pergamon Press, 1997.
- [2] Prakash O, Sang H, Embury J D. Structure and properties of Al-SiC foam [J]. Mater. Sci. Eng., 1995, A 199: 195- 203
- [3] Sugimura Y, Meyer L, He M Y, *et al*. On the mechanical performance of closed cell foams [J]. Acta Mater, 1997, 45: 5245- 5259
- [4] Ramberg W, Osgood W R. Description of stress-strain curve by three parameters [J]. NACA Technical Note, 1943, 902: 13

Uniaxial Mechanical Behavior of Aluminum Foam

WANG Xi, YU Ji-lin

(Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Anhui 230026)

Abstract: The uniaxial tensile and compression behaviors of open-cell aluminum foam with different void diameters are investigated and the deformation mechanism of the foam is revealed. It is found that the mechanical behavior of the foam not only depends on the relative density of the material but also depends on the diameter of voids. Based on the experimental results, the relationship between the macroscopic mechanical properties of the material and its micro-structure is discussed. It is shown that a Ramberg-Osgood type constitutive model may be used to describe the stress-strain relation of the material under uniaxial tension.

Key Words: Aluminum foam; stress-strain curve; micro-structure; void diameter; Ramberg-Osgood model