

文章编号: 1001-4888(2011)03-0234-06

材料非均匀性对泡沫金属拉伸性能的影响^{*}

韩春光^{1,2}, 汤立群¹, 黄小清¹

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东广州 510640; 2. 嘉应学院 土木工程学院, 广东梅州 514028)

摘要: 通过对开孔泡沫铝进行拉伸实验, 考察了泡沫金属材料的非均匀性对其拉伸性能的影响。首先, 通过分析同一批试件的初始密度, 考察了材料的初始非均匀性; 其次, 重点考察了初始密度对材料破坏特性的影响。分析表明, 即使初始密度比较接近的试件, 它们的破坏应力和应变也有较大的离散性; 对于不同初始密度的试件, 破坏强度有随初始密度的增加而变大的趋势, 但破坏应变则无明显的变化规律。因此, 对于泡沫金属这种细观结构非均匀性比较严重的材料, 仅仅使用初始密度尚不足以刻画其材料特征。对泡沫铝的拉伸破坏特性进行了图像分析, 结果表明, 材料的拉伸破坏主要是由拉伸后期才出现的细观结构破坏引起的。这说明, 早期的拉伸非线性特征主要是由材料的强非均匀性导致基体材料屈服而引起的。

关键词: 泡沫金属; 非均匀性; 准静态拉伸; 破坏特征

中图分类号: O341

文献标识码: A

0 引言

由于泡沫金属材料日益广泛的工程应用, 在各种复杂环境下, 泡沫铝构件所承受的荷载将趋于多样性, 对其拉伸力学性能的研究也具有重要的工程意义。国内外一些学者对泡沫金属材料的拉伸性能展开了研究。E. Andrews 等^[1]对开闭孔泡沫金属的拉伸模量与强度等进行了研究, 分析了实验值与预测值之间的差异因素。J. Kováčik^[2]基于渗流模型从微观与宏观两个角度对多孔金属材料的拉伸变形性能进行了研究。刘培生等^[3]建立了泡沫金属材料的三维简化力学模型, 得出了双向拉伸时的名义应力与孔隙率之间的关系式, 对双轴加载时的承载能力进行了分析。并于文献^[4-7]中对泡沫金属的抗拉强度与拉伸破坏形式进行了研究, 基于高孔隙率泡沫金属材料的分析模型导出了材料拉伸强度与孔隙率之间的理论关系, 建立了抗拉强度的计算公式, 将抗拉强度与孔率 θ 通过 $(1-\theta)$ 的幂次项型式联系在一起。通过分析材料的单向拉伸破坏机制, 发现开孔泡沫金属材料的宏观断裂特点既不同于最大拉应力准则的横向断裂, 也不同于最大剪应力准则的塑性流动破坏, 而是表现为介于它们之间的一种复杂断裂形式。Badiche 等^[8]利用照相制版技术对泡沫金属材料拉伸时的应变场进行了观察分析。项苹^[9]对泡沫金属材料的拉伸变形特征与机理进行了实验研究, 发现泡沫金属材料的拉伸变形过程具有较明显的三阶段特征。康颖安等^[10]研究了开孔与闭孔两种胞孔结构的泡沫铝在不同相对密度下的准静态拉伸力学性能, 认为泡沫铝的拉伸曲线由一个应变较小的线弹性变形段和塑性变形段组成, 塑性屈服中没有出现明显的屈服点。

本文探讨了泡沫金属材料的初始非均匀性, 重点研究了初始密度对开孔泡沫铝材料在准静态拉伸

^{*} 收稿日期: 2010-09-10; 修回日期: 2010-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(批准号: 10872070, 90916026)

通讯作者: 汤立群, 男, 教授, 博导。主要研究方向: 冲击动力学、材料本构关系和结构损伤和长期健康监测技术。E-mail: lqtang@scut.edu.cn

过程中破坏特征的影响,并基于图像分析了材料拉伸破坏的非均匀特征。

1 材料拉伸实验

本文研究的泡沫金属材料为开孔泡沫铝材料,采用颗粒铸造法制备而成,其制作方法是采用一些耐高温且可除去的无机(一般为低密度)颗粒堆积在铸模中,预热后倒入金属液,形成金属/颗粒复合体,然后采用合适的溶剂、酸或热处理方法把颗粒除去,从而产生三维网络互相连通的泡沫金属。基体材料的主要成分是铝和少量的其它金属,如硅、镁、铁、锰等。实验中使用的试件是开孔泡沫铝哑铃型试件,用线切割方法把泡沫铝板材加工成图 1 中的试件。准静态加载使用的设备为 NSTRO5567 电子万能材料试验机,在实验中采用位移加载控制方式,加载速率为 1mm/min。

1.1 初始非均匀性检验

由于泡沫铝材料本身的非均匀特性,即使是由同一块泡沫铝板材加工出的各试件其初始相对密度一般也是不同的。表 1 中编号为 T4-01 至 T4-15 的试件是由一块平均密度为 730.8kg/m³ 的泡沫铝板材用线切割方法加工出的十五个哑铃型试件,表 1 中数值是各试件的密度与相对密度的测量值。从表中数据可求出各试件总体的密度标准差为 32.24,相对密度的标准差为 0.01194,密度最小的试件同密度最大的试件之间的相对差异达到了十五个百分点。这些数据表明了材料具有较明显的非均匀性。

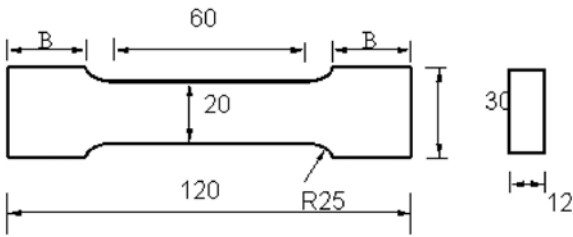


图 1 开孔泡沫铝拉伸哑铃型试件示意图(单位 mm)
Fig.1 Dumbbell-shaped specimen of open-cell aluminum foams (units mm)

表 1 泡沫铝试件的密度与相对密度(同一板材)

Tab.1 Densities and relative densities of aluminum foam specimens (from a same plate)

试件	密度(kg/m ³)	相对密度	试件	密度(kg/m ³)	相对密度
T4-01	723.5	0.2680	T4-09	692.0	0.2563
T4-02	727.4	0.2694	T4-10	750.2	0.2778
T4-03	686.7	0.2543	T4-11	718.1	0.2660
T4-04	692.4	0.2564	T4-12	758.8	0.2810
T4-05	728.6	0.2699	T4-13	718.9	0.2663
T4-06	734.0	0.2718	T4-14	715.9	0.2652
T4-07	811.7	0.3006	T4-15	779.1	0.2886
T4-08	727.2	0.2693			

1.2 拉伸应力应变关系

为了克服初始密度不同的影响,我们从不同泡沫铝板材所加工出的试件中选择了初始密度比较接近的五个试件作为分析对象(表 2),它们是编号为 Ta-1 至 Ta-5 的一组试件。

图 2 是五个试件的准静态拉伸应力—应变实验曲线,从图中可以看出,各试件的拉伸曲线有典型的非线性特征。在拉伸的初始阶段材料无明显的线弹性阶段。当试件的拉伸应变逐步增大时,拉伸曲线弯曲更明显,曲线上各点的切线斜率逐渐减小,切线模量值减小。当材料应力达到最大值后,材料的拉伸应力反而随拉伸应变的增加而缓慢减小,切线弹性模量值小于 0,这一阶段可定义为材料的破坏发展阶段。最后,整体材料到达破坏点,在某一截面上产生断裂破坏而失去承载能力。

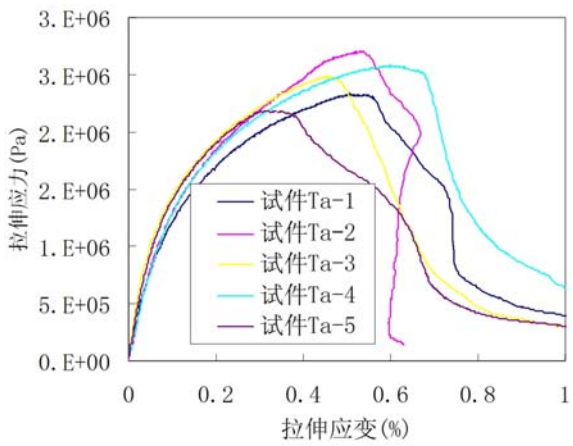


图 2 不同密度开孔泡沫铝试件在准静态拉伸下的应力—应变曲线

Fig. 2 Experiment tensile stress-strain curves of the open-cell aluminum foam specimens with different densities

2 材料中初始密度的非均匀性对破坏性能的影响

2.1 相近初始密度下的破坏特性

由表 1 中数据可知,同一块泡沫板材中不同区域泡沫材料的初始密度有一定的离散度,故在不同的泡沫铝试件与同一试件中的不同区域,其初始密度是非均匀的,为了研究初始密度对材料性能的影响,这里对不同相对密度的泡沫铝试件的实验数据进行研究。

各试件在拉伸破坏过程的拉伸应力值有一个最大值点,取此峰值点对应的应力与应变分别为材料的破坏应力值与破坏应变值。而试件在拉伸实验过程中的各应变点处的切线弹性模量可用数值方法近似得到,对于第 i 个数据点,其切线弹性模量值 E_i' 可由下式近似得出:

$$E_i' = \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} \approx \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_{i-1}}{\epsilon_{i+1} - \epsilon_{i-1}} \quad (1)$$

把实验中 36 个泡沫铝“哑铃型”试件按相对密度的分布分为五组,表 2 为各组试件的材料参数均值,表中括号里数值为各组实验值的均方差,表中的初始切线弹性模量仅为拉伸初始线弹性阶段的数学期望值。可以看出,材料的初始相对密度对材料的弹性模量、破坏应力与破坏应变均有较明显的影响。从表 2 中也可以看出,当试件组的平均相对密度增加时,其弹性模量与破坏应力相应有所增大的趋势,而破坏应变则表现出相应减小的趋势。从表 2 中各实验值的均方差可以看出,虽然在同一组试件中各试件的初始密度比较接近,但各试件的初始切线弹性模量、破坏极限和破坏应变的实验值均存在一定的离散度。这说明,对于泡沫金属材料,仅用初始密度来描述材料的特征是不够的。

表 2 不同相对密度试件的材料参数

Tab. 2 Material parameters of specimens with different densities

组号/ (试件数)	平均相对密度/ (均方差)	平均初始切线弹性 模量/(均方差)	平均破坏应力(MPa)/ (均方差)	平均破坏应变(%)/ (均方差)
Ta1/(7)	0.259/(0.00787)	1.775/(0.171)	2.21/(0.434)	0.541/(0.0595)
Ta2/(8)	0.267/(0.00204)	1.814/(0.138)	2.36/(0.264)	0.513/(0.0627)
Ta3/(8)	0.273/(0.00292)	1.923/(0.215)	2.90/(0.424)	0.500/(0.0666)
Ta4/(7)	0.286/(0.00340)	2.056/(0.245)	3.486/(0.334)	0.483/(0.0702)
Ta5/(6)	0.301/(0.00834)	2.312/(0.287)	4.025/(0.306)	0.460/(0.0422)

2.2 不同初始密度下的破坏特性

图 3(a)是从多个泡沫铝板材切割加工出的,不同初始相对密度试件的线弹性阶段的切线弹性模量—相对密度数据图,图 3(b)是破坏应力—相对密度数据图,图 3(c)是这些试件的破坏应变—相对密度

数据图。由于泡沫材料的非均匀特性,同一相对密度的试件其材料物理参数也具有一定的随机性,从图3中各图可以看出,相对密度相近的各试件所对应的数据点也有不同程度的分散。从图3(a)(b)可以看出,当开孔泡沫材料的相对密度增加时,材料的切线弹性模量值与破坏应力值具有相应增大的趋势,但图3(c)图表明破坏应变的变化趋势不明显。这充分说明材料的非均匀性对材料的拉伸特征影响很严重。

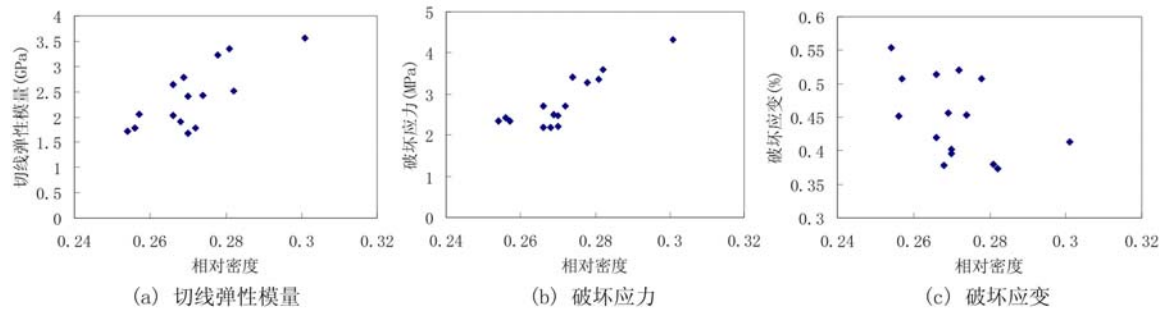


图3 泡沫铝切线弹性模量、破坏应力、破坏应变与相对密度的关系

Fig. 3 Variations of tangent modulus, failure stress and failure strain versus relative density of the aluminum foams

3 屈服与破坏特征

3.1 屈服特征分析

图4(a)是Ta-1试件在各阶段的切线弹性模量—应变曲线(其它试件的类似),图4(b)是初始拉伸小应变阶段五个试件的切线弹性模量—应变曲线。从图4可以看出,无论是从拉伸的总体过程还是初始阶段看,泡沫铝的切线弹性模量总是在递减的,即对这类材料不存在明显的线弹性阶段。这说明由于细观结构的非均匀性,导致实体材料应变分布严重不均匀,从而在拉伸早期阶段,就存在实体材料的屈服或者破坏。

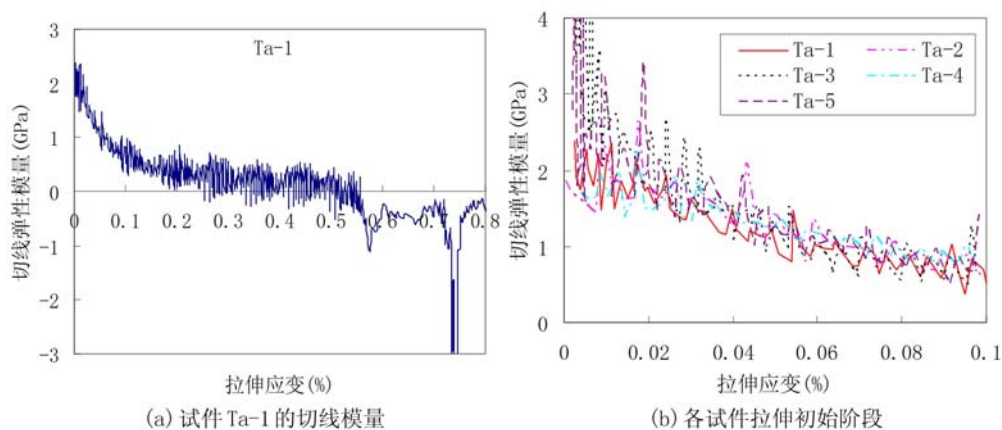


图4 泡沫铝材料准静态拉伸下切线弹性模量—应变曲线

Fig. 4 The tensile tangent modulus-strain curves of the aluminum foams

3.2 临界破坏的细观特征

图5中各图为试件Ta-1在破坏过程的细观破坏特征图片。图5(a)是拉伸应变为0.4%时的图像,此时,试件开始有极少量单元的胞壁产生了断裂破坏(图中圆圈所圈处)。图5(b)为试件应变值为0.5%时的图像,此时试件表面中进入破坏的单元数目增多。当拉伸应变约为0.6%时,试件表面已经破坏的单元显著增多,表面破坏单元开始联结在一起形成表面小裂纹,如图5(c)所示。图5(d)为拉伸应变为0.7%时试件最终断裂截面的图像。

由上所述,泡沫金属材料的拉伸破坏主要是由于材料内破坏单元贯通形成小裂纹,再进一步延展形成贯穿性大裂纹所致,其破坏表现出明显的非均匀特征。但由于裂纹是在材料临界破坏时才大量观察

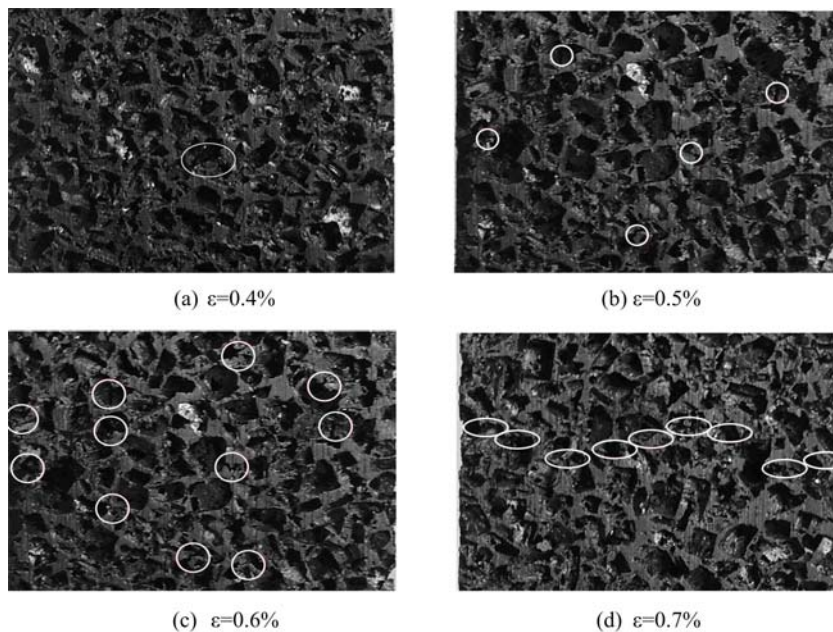


图 5 试件拉伸过程的细观破坏特征

Fig. 5 Meso-failure features of the specimen in tension

到的,这说明泡沫金属早期拉伸时的非线性特征,主要是由材料的强非均匀应力场导致实体材料屈服而引起的。

4 结论

本文通过实验研究分析了泡沫金属材料在准静态拉伸时的力学性能,得到了泡沫金属材料在其破坏前的实验应力—应变关系,得出以下结论:

(1) 泡沫金属材料存在严重的细观非均匀性。当开孔泡沫材料的相对密度增加时,材料的切线弹性模量值与破坏应力值具有相应增大的趋势,但破坏应变的变化趋势不明显。这充分说明材料的非均匀性对材料的拉伸特征影响很大,同时说明但凭初始密度不足以描述泡沫金属的材料特性,特别是破坏特性。

(2) 泡沫金属在拉伸过程(哪怕是初始阶段,应变 $\leq 0.1\%$),材料都不存在典型的线弹性阶段,而材料的拉伸破坏主要是由拉伸后期才出现的细观结构破坏引起的,这说明早期的拉伸非线性特征主要是由材料细观结构的强非均匀性导致基体材料屈服而引起的。

参考文献:

- [1] Andrews E, Sanders W, Gibson L J. Compressive and tensile behaviour of aluminum foams[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 270(2): 113—124.
- [2] Kováčik J. The tensile behaviour of porous metals made by GASAR process[J]. Acta Materialia, 1998, 15(46): 5413—5422.
- [3] Peisheng Liu, Chao Fu, Tiefan Li, et al. Relationship between tensile strength and porosity for high porosity metals [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 1999, 42(1): 100—107.
- [4] Peisheng Liu, Mechanical behaviors of porous metals under biaxial tensile loads[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 422(1-2): 176—183.
- [5] 刘培生, 付超, 李铁藩. 高孔率金属材料的抗拉强度[J]. 稀有金属材料与工程, 2000, 29(2): 94—100 (LIU Peisheng, FU Chao, LI Tiefan. Tensile Strength of High-Porosity Metal[J]. Raremetal Material and Engineering, 2000, 29(2): 94—100 (in Chinese))
- [6] 刘培生, 梁开明, 顾守仁 等. 多孔金属抗拉强度公式中的指数项取值[J]. 力学学报, 2001, 33(6): 853—855 (LIU Peisheng, LIANG Kaiming, GU Shouren, et al. The Exponential Item in Formulas for Calculating Tensile Strength

- of Porous Metal[J]. ACTA Mechanica Sinica, 2001, 33(6): 853—855 (in Chinese))
- [7] 刘培生. 泡沫金属在单、双向载荷作用下的拉伸破坏行为初探 [J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(5): 770—773 (LIU Peisheng, Tensile Failure Behavior of Metal Foams under Uniaxial and Biaxial Loads[J]. Raremetal Material and Engineering, 2006, 35(5): 770—773 (in Chinese))
- [8] Badiche X, Forest S, Guibert T, et al. Mechanical properties and non-homogeneous deformation of open-cell nickel foams: application of the mechanics of cellular solids and of porous materials[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 1-2(289): 276—288.
- [9] 项苹. 开孔泡沫铝物理及力学性能的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008 (XIANG Ping, Investigation of the Physical and Mechanical Properties of Open-cell Aluminum Foams[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008 (in Chinese))
- [10] 康颖安, 张俊彦, 赵荣国. 泡沫铝结构对其拉伸力学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2006, 30(9): 51—53 (KANG Ying'an, ZHANG Junyan, ZHAO Rongguo. Effect of Cell Structure on the Uniaxial Tensile Properties of Aluminum Foams[J]. Materials for Mechanical Engineer, 2006, 30(9): 51—53 (in Chinese))

Effects of Material Heterogeneity on the Tensile Properties of Metal Foams

HAN Chuan-guang^{1,2}, TANG Li-qun¹, HUANG Xiao-qing¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

2. School of Civil Engineering, JiaYing University, Meizhou, Guangdong 514028, China)

Abstract: Experimental investigation of material heterogeneity effect on the tensile properties of metal foam was carried out. Firstly, the material initial heterogeneity was reviewed by analyzing the initial density of specimens of the same group. Next, the review was focused on the effect of initial density on the material failure characteristic. Analytical results show that even for specimens with approximate same initial density, their failure stress and strain still present obvious discreteness. And for the specimens with different initial density, their failure stresses increases with the increment of initial density, but failure strain does not present any obvious regular patterns. Therefore, for metal foam with highly complicated meso-structure heterogeneity, it is not enough to describe their material characteristics only using initial density. Image analysis of the foam aluminum tensile failure characteristics shows that the material failure is caused by the meso-structure's failure appeared at the tensile later stage, which indicates that the nonlinearity at the early tensile stage is mainly caused by the yield of matrix material induced due to the serious heterogeneous meso-structure.

Keywords: metal foam; heterogeneity; quasi-static tension; failure characteristics