

文章编号: 1001-1455(2006)01-0033-06

非均匀泡沫金属材料在冲击载荷下的变形模拟*

张 钰 鈞, 赵 隆 茂

(太原理工大学应用力学研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 提出一种二维非线性弹塑性质量-弹簧-连杆模型, 该模型将泡沫金属材料离散成许多质量块, 质量块在受载方向由非线性弹塑性弹簧连接, 垂直于受载方向由可延伸的弹性连杆铰接。采用该模型模拟并分析了层非均匀泡沫金属材料及局部不均匀泡沫金属材料在冲击载荷下的变形特性, 说明了非均匀性对泡沫金属材料冲击变形的影响。

关键词: 固体力学; 质量-弹簧-连杆模型; 冲击载荷; 非均匀泡沫金属材料; 变形; 模拟

中图分类号: O347 **国标学科代码:** 130 · 1515 **文献标志码:** A

1 引 言

由于泡沫金属材料具有较高的比强度和比刚度, 是一种性能优越的功能结构材料。特别是泡沫金属材料在变形过程中具有较高的能量吸收能力, 在抗冲击或振动结构中得到越来越多的应用。因此, 泡沫金属材料在冲击载荷下力学性能的实验测试和理论预测将成为泡沫金属材料工程应用的基础。迄今为止, 泡沫金属结构动力学方面的研究报道较多的是在实验研究方面, 理论分析及数值模拟较少见, 且一般未考虑材料的均匀性。实际上, 无论采用哪一种制备方法, 泡沫金属材料在制做过程中都有可能存在不均匀性, 其力学行为也有显著的改变, 特别是在动载荷作用时, 载荷作用与不均匀性相互影响, 会改变泡沫金属材料的变形形式, 分析也更困难。T. Daxner 等^[1]提出一种准一维的弹塑性质量-弹簧模型, 分析了泡沫金属材料在受撞击变形过程中, 密度不均匀对最大应力及能量吸收的影响。S. A. Meguid^[2]对密度变化和存在缺陷的泡沫金属材料的压垮行为进行了有限元模拟。

本文中提出一种非线性二维弹塑性质量-弹簧-连杆模型, 模拟密度不均匀泡沫金属材料在冲击载荷下的变形。采用该模型对几种具有不同密度分布的泡沫金属材料在不同载荷强度下的变形进行分析, 探究材料不均匀对其变形的影响。

2 泡沫金属材料的简化模型

如图 1(a)所示, 长为 L 、宽为 W 、厚度为 H 的泡沫金属材料, 受矩型脉冲载荷 $P(t)$ 作用, 作用时间为 T 。泡沫金属材料由离散的质量块表示, 质量块在其受载方向由非线性弹塑性弹簧连接, 质量块在垂直于受载方向由可延伸的弹性杆铰接(见图 1(b))。泡沫金属的微观不均匀性可由一个或几个质量块密度的改变来描述。

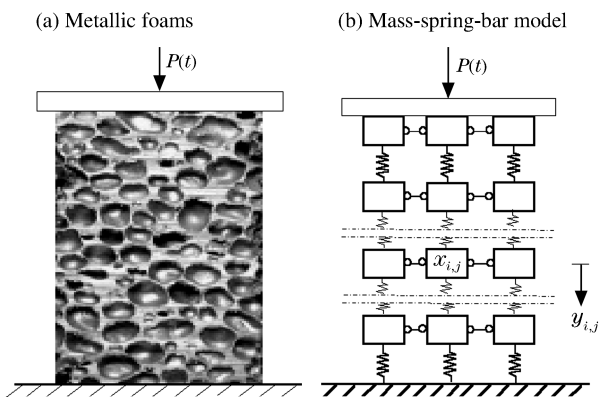


图 1 简化计算模型

Fig. 1 Simplified calculation model

* 收稿日期: 2004-11-30; 修回日期: 2005-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(90205018); 山西省自然科学基金项目(20041006);

山西省留学归国基金项目(2003-23)

作者简介: 张钰鈞(1957—), 女, 硕士, 副教授。

2.1 非线性动力平衡方程

假设在冲击变形过程中,第*i*行第*j*列的质量块密度为 $\rho_{i,j}$,所受压应力 $\sigma_{i,j}$ 为正值,弹性杆拉伸应力为 $\sigma'_{i,j}$,质量块受载方向的面积近似不变,若分别以 ρ 、 E 、 σ_y 、 ϵ_y 、 ϵ_1 表示泡沫金属材料的密度、压缩弹性模量、压缩屈服应力及屈服、溃塌应变,并设 $\epsilon_y=1/(E/\sigma_y)$, $p(t)=P(t)/\sigma_y$, $\tau=t/(L/\sqrt{E/\rho})$, $\tau_d=T/(L/\sqrt{E/\rho})$,可得质量块系统的无量纲动力平衡方程

$$c_{i,j} \ddot{y}_{i,j} = \epsilon_y N \left((\bar{\sigma}_{i+1,j} - \bar{\sigma}_{i,j}) + (\bar{\sigma}'_{i,j} \sin\theta_{i,j} - \bar{\sigma}'_{i,j-1} \sin\theta_{i,j-1}) \frac{M}{W} \frac{L}{N} \right) \quad (1)$$

$$c_{i,j} \ddot{x}_{i,j} = \epsilon_y M (\bar{\sigma}'_{i,j} \cos\theta_{i,j} - \bar{\sigma}'_{i,j-1} \cos\theta_{i,j-1}) \quad (2)$$

式中: $c_{i,j}=\rho_{i,j}/\rho$, $\ddot{y}_{i,j}=\ddot{y}_{i,j}/(E/(\rho L))$, $\ddot{x}_{i,j}=\ddot{x}_{i,j}/(E/(\rho W))$, $\bar{\sigma}_{i,j}=\sigma_{i,j}/\sigma_y$, $\bar{\sigma}'_{i,j}=\sigma'_{i,j}/\sigma_y$,且 $\bar{\sigma}_{i,N+1}=p(\tau)$ 。

初始条件为

$$\begin{cases} \bar{y}_{i,j} |_{\tau=0} = 0, & \dot{\bar{y}}_{i,j} |_{\tau=0} = 0 \\ \bar{x}_{i,j} |_{\tau=0} = 0, & \dot{\bar{x}}_{i,j} |_{\tau=0} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\bar{y}_{i,j}=y_{i,j}/L$, $\dot{\bar{y}}_{i,j}=\dot{y}_{i,j}/\sqrt{E/\rho}$, $\bar{x}_{i,j}=x_{i,j}/W$, $\dot{\bar{x}}_{i,j}=\dot{x}_{i,j}/\sqrt{E/\rho}$ 。

压缩应变与非线性弹簧质量块无量纲位移的关系为

$$\epsilon_{i,j} = N(\bar{y}_{i,j} - \bar{y}_{i-1,j}) \quad (4)$$

弹性杆应变与质量块无量纲位移的关系为

$$\epsilon'_{i,j} = M \sqrt{\left(\frac{L}{W} (\bar{y}_{i,j+1} - \bar{y}_{i,j}) \right)^2 + \left(\frac{1}{M} + \bar{x}_{i,j+1} - \bar{x}_{i,j} \right)^2} - 1 \quad \begin{matrix} i=1,2,3,\dots,N; \\ j=1,2,3,\dots,M-1 \end{matrix} \quad (5)$$

冲击载荷强度应满足

$$p(\tau) = \begin{cases} P(\tau)/\sigma_y & 0 \leq \tau \leq \tau_d \\ 0 & \tau > \tau_d \end{cases} \quad (6)$$

无量纲非线性动力平衡方程(1)、(2)采用有条件稳定的显式积分格式,以数值积分方法求解,对一质量块弹簧系统的稳定性条件为 $(\Delta t_{cr})_{i,j} \leq 2\sqrt{m_{i,j}/k_{i,j}}$,其中 $k_{i,j}$ 为弹簧刚度,由非线性弹塑性弹簧的本构关系确定。对多质量块弹簧系统则计算每一个质量块弹簧系统的 $(\Delta t_{cr})_{i,j}$,并取下式作为计算时间步长,以保证解的稳定性,即

$$\Delta t_{cr} = \min(k_{i,j}(\Delta t_{cr})_{i,j}) \quad i=1,2,3,\dots,N; \quad j=1,2,3,\dots,M \quad (7)$$

2.2 泡沫金属材料非均匀性描述

泡沫金属的非均匀性可由质量块的密度变化来表示。若质量块的密度为 $\rho_{i,j}$,其压缩弹性模量、压缩屈服应力、屈服应变及溃塌应变分别为 $E_{i,j}$ 、 $(\sigma_{i,j})_y$ 、 $(\epsilon_{i,j})_y$ 和 $(\epsilon_{i,j})_1$,与泡沫金属材料相应量之比为 $\rho_{i,j}/\rho=c_{i,j}$, $E_{i,j}/E=e_{i,j}$, $(\sigma_{i,j})_y/\sigma_y=s_{i,j}$, $(\epsilon_{i,j})_y/\epsilon_y=b_{i,j}$, $(\epsilon_{i,j})_1/\epsilon_1=d_{i,j}$ 。不均匀性系数 $e_{i,j}$ 、 $s_{i,j}$ 、 $b_{i,j}$ 和 $d_{i,j}$ 可根据泡沫金属材料的压缩性质^[3~4],用密度比 $c_{i,j}$ 表示:(1)对开细胞泡沫金属材料, $e_{i,j}=c_{i,j}^2$, $s_{i,j}=c_{i,j}^{3/2}$, $b_{i,j}=s_{i,j}/e_{i,j}$; (2)对闭细胞泡沫金属材料, $e_{i,j}=c_{i,j}$, $s_{i,j}=c_{i,j}$, $b_{i,j}=s_{i,j}/e_{i,j}$ 。由此可得, $(\sigma_{i,j})_y=s_{i,j}\sigma_y$, $(\epsilon_{i,j})_y=b_{i,j}\epsilon_y$, $(\epsilon_{i,j})_1=d_{i,j}\epsilon_1$ 。

2.3 非线性弹塑性弹簧及弹性杆的本构关系

泡沫金属材料在单向冲击载荷下的压缩应力-应变关系可分三个阶段,即:孔胞壁弹性弯曲引起泡沫金属材料产生的弹性变形、孔胞的溃塌导致泡沫金属材料的塑性变形及孔胞壁挤压引起的应力迅速增长过程,如图2所示。

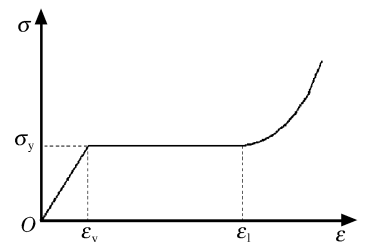


图2 泡沫金属材料的应力-应变关系

Fig. 2 Stress-strain relationship of metallic foams

三个阶段的应力-应变关系分别为

$$\bar{\sigma}_{i,j} = e_{i,j} \epsilon_{i,j} / \epsilon_y \tag{8}$$

$$\bar{\sigma}_{i,j} = s_{i,j} \tag{9}$$

$$\bar{\sigma}_{i,j} = s_{i,j} \left(1 + \beta \left(\tan \left(\frac{\pi}{2} \left((1 - \gamma) + \gamma \frac{\epsilon_{i,j} - d_{i,j} \epsilon_1}{1 - d_{i,j} \epsilon_1} \right) \right) - \tan \left(\frac{\pi}{2} (1 - \gamma) \right) \right) \right) \tag{10}$$

弹性杆拉伸应力-应变关系为

$$\bar{\sigma}'_{i,j} = \frac{2\epsilon'_{i,j}}{\epsilon_y (e_{i,j} + e_{i,j+1})} \tag{11}$$

由于非线性弹簧卸载过程中反向拉伸的承受能力与压缩承受能力相比小得多,分析中假设拉伸应力为 0。而卸载后再加载时泡沫金属材料的应力-应变关系尚无公开报道,假设泡沫金属材料在加载过程中产生的最大应变为 $(\epsilon_{i,j})_{\max}$,在冲击载荷下,泡沫金属材料变形过程所遵循的加、卸载本构方程如下

$$d\bar{\sigma}_{i,j} = e_{i,j} d\epsilon_{i,j} / \epsilon_y \begin{cases} 0 \leq (\epsilon_{i,j})_{\max} \leq (\epsilon_{i,j})_y \\ (\epsilon_{i,j})_y < (\epsilon_{i,j})_{\max} < (\epsilon_{i,j})_1, \begin{cases} \epsilon_{i,j} = (\epsilon_{i,j})_{\max}, d\epsilon_{i,j} < 0 \\ \epsilon_{i,j} = (\epsilon_{i,j})_{\max} - (\epsilon_{i,j})_y, d\epsilon_{i,j} \geq 0 \end{cases} \\ (\epsilon_{i,j})_{\max} \geq (\epsilon_{i,j})_1, (\epsilon_{i,j})_1 - (\epsilon_{i,j})_y \leq \epsilon_{i,j} < (\epsilon_{i,j})_1 \end{cases} \tag{12}$$

$$d\bar{\sigma}_{i,j} = 0 \begin{cases} (\epsilon_{i,j})_y < (\epsilon_{i,j})_{\max} < (\epsilon_{i,j})_1, \begin{cases} \epsilon_{i,j} = (\epsilon_{i,j})_{\max}, d\epsilon_{i,j} \geq 0 \\ \epsilon_{i,j} = (\epsilon_{i,j})_{\max} - (\epsilon_{i,j})_y, d\epsilon_{i,j} < 0 \\ \epsilon_{i,j} < (\epsilon_{i,j})_{\max} - (\epsilon_{i,j})_y \end{cases} \\ (\epsilon_{i,j})_{\max} \geq (\epsilon_{i,j})_1, (\epsilon_{i,j})_1 - (\epsilon_{i,j})_y \leq \epsilon_{i,j} < (\epsilon_{i,j})_1 \end{cases} \tag{13}$$

当 $(\epsilon_{i,j})_{\max} \geq (\epsilon_{i,j})_1, \epsilon_{i,j} \geq (\epsilon_{i,j})_1$ 时,按本构方程(10)求导。

3 冲击载荷下非均匀泡沫金属材料的变形模拟及分析

对本文中所提出的模型,当施加压力脉冲时,上层质量块通过压缩弹簧依次压向相邻下层质量块,上层质量块作用于相邻下层质量块的应力可由它们的相对位移按应力-应变关系式(7)、式(8)和式(9)确定。弹簧压紧过程中,泡沫金属材料细胞壁弹性屈曲或塑性溃塌,材料密化,变形增加,达到一定程度后,应力急剧增加,推动相邻质量块向相反方向移动,弹簧处于卸载阶段。经过计算可知,当 $N=10$ 时,即可满足精度要求。本文分析中取 $N=10, M=10$,泡沫金属材料的压缩特性参数分别为^[5]: $\beta=0.275, \gamma=0.05, \epsilon_y=0.046, \epsilon_1=0.68, \tau_d=1.0, \Delta\tau=\tau_d/15\ 000$ 。

3.1 层非均匀泡沫金属材料的变形

设泡沫金属材料的密度为 ρ ,不均匀层材料的密度为 ρ' 。若不均匀层的位置不变,皆在受载端起的第 3、4、5 层,当其密度比值 ρ'/ρ 分别为 1.2、0.8 和 0.6 时,在压力脉冲强度 $p=4.5(\tau=1)$ 时,产生的变形模式分别如图 3(b)~(d)所示。从图中可以看出,泡沫金属材料的变形随着不均匀层密度的减小而增加,总变形分别为 31%、36% 和 40%,而在相同载荷下均匀泡沫金属材料总变形为 33%(见图 3(a))。可见泡沫金属材料不均匀程度对其变形是有影响的。另外,不均匀层材料与其他部分材料的密度比值不变($\rho'/\rho=0.6$),但所处位置不同,如图 3(d)~(e),其中图 3(e)中不均匀层的位置在受载端起第 6、7、8 层,相同压力脉冲强度下也会产生不同的变形模式。而且,由于不均匀层密度较低时,当压力脉冲强度较高时,还可能导致泡沫金属材料破坏,从图 3(d)可看出不均匀层以上的材料在脉冲载荷下溃破。

3.2 局部非均匀泡沫金属材料的变形

图 4 描述了不均匀区域材料密度 ρ' 与泡沫金属材料密度 ρ 的比值较低($\rho'/\rho=0.5$) 或很高($\rho'/\rho=10$) 时,压力脉冲作用下的变形模式。

可以看出,无论哪一种情况,不同压力脉冲强度下其变形模式是不同的。两种情况对比还可看出,即使在相同压力脉冲强度下,局部不均匀程度也会影响泡沫金属材料的变形或破坏模式。如当压力脉

冲强度均为 6.0 时,两种局部不均匀泡沫金属材料中,不均匀区域材料的密度 ρ' 较泡沫金属材料的密度 ρ 低时,在不均匀区域出现局部细胞塑性溃塌(见图 4(d)),而不均匀区域材料的密度 ρ' 较泡沫金属材料的密度 ρ 高时,则出现局部开裂溃破(见图 4(f)),导致材料失效。

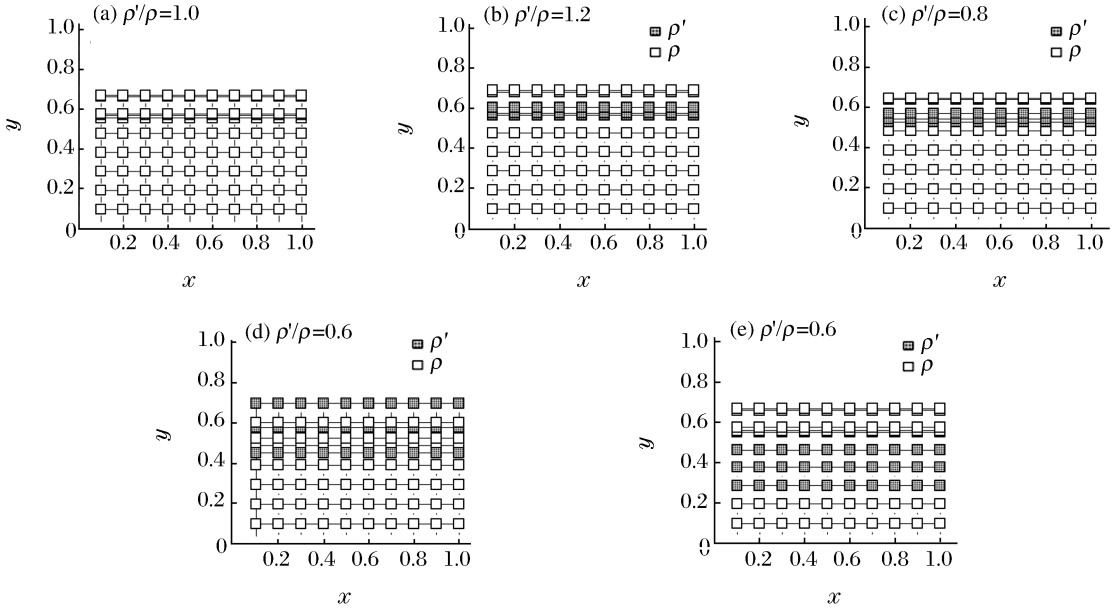


图3 层不均匀泡沫金属材料的变形($\tau=1.0, p=4.5$)

Fig. 3 The deformations of the metallic foams with the heterogeneous density layers

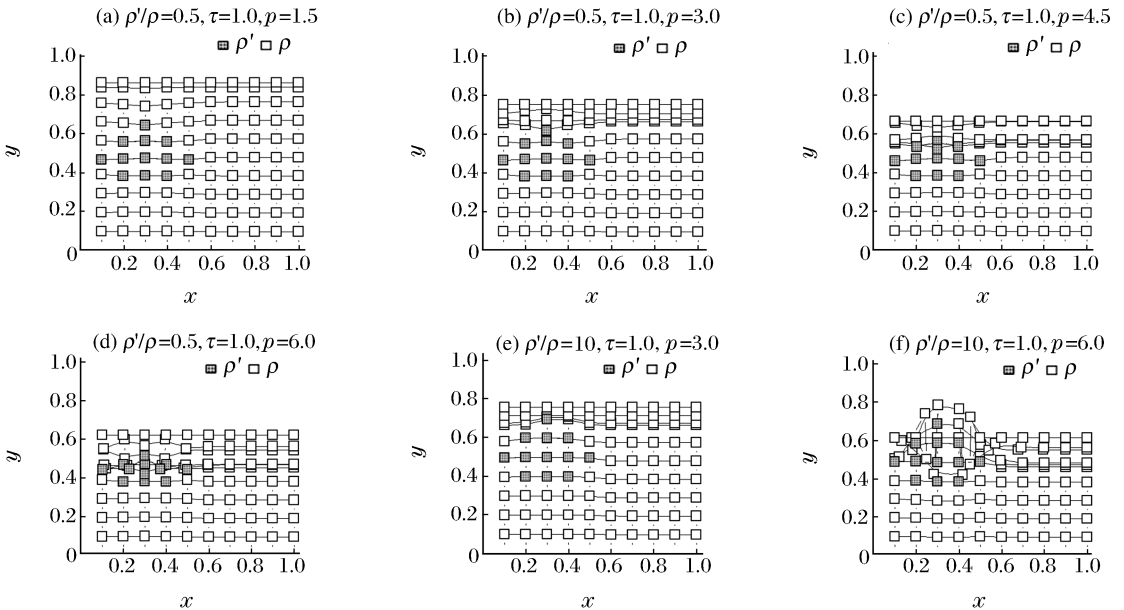


图4 局部不均匀泡沫金属材料在不同压力脉冲强度下的变形

Fig. 4 The deformation of the metallic foams with the local heterogeneous density under different impact loading

3.3 $\tau > 1$ 时局部非均匀泡沫金属材料的变形

当 $\tau > 1$ 时,压力脉冲强度为 $p=0$ 。由图 5 可以看出,由于冲击载荷产生的动态作用,在载荷释去后,泡沫金属材料的惯性效应使之继续变形。局部不均匀泡沫金属材料在同样条件下($p=3.0$),变形过程不同,且非均匀泡沫金属材料的变形过程与其非均匀程度密切相关。

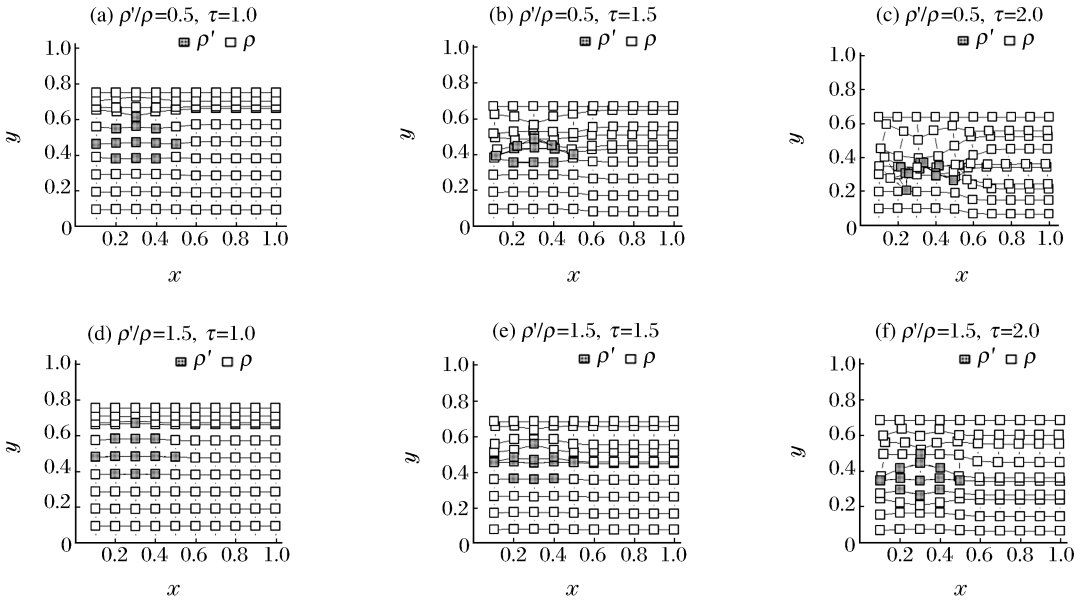


图 5 局部非均匀泡沫金属材料的变形($p=3.0$)

Fig. 5 Deformation of metallic foams with local density variations

4 结论和讨论

提出了质量-弹簧-连杆模型,对非均匀泡沫金属材料在冲击载荷下的变形模拟显示了载荷强度、不均匀程度及非均匀区域位置对其变形模式及变形量的影响。V. S. Deshpande 等^[6]采用 SHPB 法对铝合金泡沫金属材料(Alulight)所做的高应变率下的动态冲击实验中提出大部分材料密化现象出现在两个区域,但密化区域的位置是随机的,如图 6 所示。通过分析可知,变形密化区域的随机性可能与冲击载荷强度、材料密度的不均匀及不均匀的位置和程度有关,本文中材料某些层密度不均匀的变形模拟结果与此相似。S. A. Meguid 等^[2]和 R. Gradinger 等^[7]对微观不均匀泡沫金属材料的压缩失效实验研究展示了材料由不均匀引起的局部压垮及破坏现象,如图 7~8 所示。本文中给出局部不均匀泡沫金属材料的变形模型也可描述类似的压垮及破坏过程。由于无论采用什么制备方法,泡沫金属材料成型过程中出现非均匀缺陷是难免的,而且其非均匀性是随机的,仅从对泡沫金属材料进行的动态实验得出其变形特性及规律是很困难的,所以建立正确的数值分析模型对深入了解泡沫金属动态变形过程是有意义的。

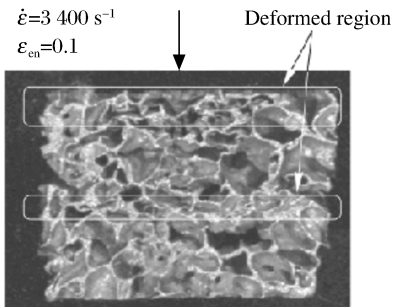


图 6 Alulight 试件的变形
Fig. 6 Deformation of an Alulight specimen

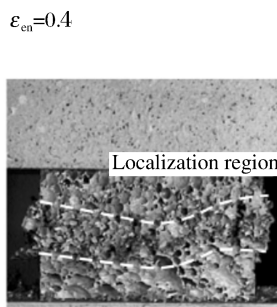


图 7 非均匀铝泡沫金属材料的局部变形
Fig. 7 Localized deformation of heterogeneous aluminium foams

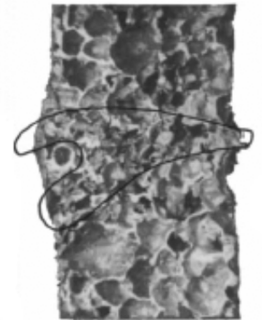


图 8 非均匀泡沫金属轴向压缩下非弹性应变区域(AlMg0.6Si0.3)
Fig. 8 Inelastic strain region of heterogeneous metallic foams under uniaxial compression

参考文献:

- [1] Daxner T, Böhm H J B, Rammerstorfer F G. Mesoscopic simulation of inhomogeneous metallic foams with respect to energy absorption[J]. *Computational Materials Science*, 1999,16(1):61—69.
- [2] Meguid 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 (7):631—643.
- [3] Gibson L J. Mechanical behavior of metallic foams[J]. *Annual Review Materials Science*, 2000,30(1):191—227.
- [4] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2ed[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997:183—217.
- [5] Li Q M, Meng H. Attenuation or enhancement—a one-dimensional analysis on shock transmission in the solid phase of a cellular material[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002,27(10):1049—1065.
- [6] Deshpande V S, Fleck N A. High strain rate compressive behavior of aluminum alloy foams[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000,24(3):277—298.
- [7] Gradinger R, Rammerstorfer F G. On the influence of meso-inhomogeneities on the crush worthiness of metal foams[J]. *Acta Materials*, 1999,47(1): 143—148.

A numerical simulation on the deformation of heterogeneous metallic foams subjected to impact loading

ZHANG Yi-fen^{*}, ZHAO Long-mao

*(Institute of Applied Mechanics, Taiyuan University of Technology,
Taiyuan 030024, Shanxi, China)*

Abstract: A two-dimensional nonlinear mass-spring-bar model is presented in this paper to simulate the deformation of metallic foams with heterogeneous density in layers or in local regions. The metallic foam is modeled as an array of discrete lump masses linked with elastic-plastic springs in the loading direction and constrained by hinged extensible rods transversely to the loading direction. The effects of the heterogeneity in metallic foams on their deformation under impact have been analysed.

Key words: solid mechanics; mass-spring-bar model; impact loading; heterogeneous metallic foam; deformation; numerical simulation

^{*} Corresponding author: ZHANG Yi-fen
E-mail address: zhangyifen16@126.com
Telephone: 0351-6018624