

文章编号: 1000-5773(2008)02-0118-07

惯性对多孔金属材料动态力学行为的影响*

刘耀东, 虞吉林, 郑志军

(中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要:对泡沫金属材料的力学性能已经进行了十分广泛的研究,但在对泡沫金属的应变率效应和惯性效应的研究中,尚存在一些矛盾的结论。为进一步认清惯性在多孔金属动态响应中的作用,用有限元计算方法模拟了二维 Voronoi 蜂窝的动态压缩行为,得到了不同速度下 Voronoi 蜂窝的 3 种变形模式。通过改变基体材料的密度和冲击速度进行“数值实验”,得到了相应“试件”的由冲击面和支撑面得到的宏观平均应力应变曲线和平台应力。根据数值模拟的结果,着重分析了惯性效应的影响。研究发现,惯性并不影响蜂窝的应力应变曲线,但它导致试件中宏观变形不均匀,是平台应力提高的主要原因。

关键词:泡沫金属; Voronoi 蜂窝; 惯性效应; 应变率效应

中图分类号: O344.3 **文献标识码:** A

1 引 言

近十年来,多孔金属材料由于其具有独特的优异特性,因而在工业领域特别是高技术领域受到越来越广泛的重视,也引起了国内外学者浓厚的研究兴趣。多孔泡沫铝是目前研究最为成熟的一种泡沫金属材料,它具有减振、阻尼、吸音、隔音、隔热、散热、电磁屏蔽等物理性能,又具有密度小、轻质、高比强度的特点,是一种多用途兼用的结构和功能材料。因此人们对其力学性能越来越关注,并期望得到力学性能更好的泡沫金属。

作为抗冲击或吸能方面的应用,材料行为的速率效应是人们关注的重点。对各种泡沫金属材料的动态力学行为,已经做了大量实验研究。然而,文献中对泡沫金属材料的动态强度与应变率的关系尚存在一些相互矛盾或令人混淆的结论。例如, Mukai 等^[1]对一种相对密度为 $\bar{\rho}=0.1$ 的商业闭孔泡沫铝合金 ALPORAS(Al-Ca-Ti)的压缩行为进行了静态和动态压缩实验,得到了相应的应力应变曲线,通过比较 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 和 $2.5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 两种应变率下的结果,他们认为这种泡沫铝合金的屈服应力具有明显的应变率敏感性。Paul 和 Ramamurty^[2]在室温下对相对密度为 $\bar{\rho}=0.08 \sim 0.10$ 的 ALPORAS 进行了应变率范围为 $3.33 \times 10^{-5} \sim 1.6 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的压缩实验,并将所得结果与 Mukai 等^[1]的实验结果结合进行了比较,认为 ALPORAS 在较高应变率时的塑性强度(定义为塑性失稳时的峰值应力)是应变率相关的。Lankford 和 Danneman^[3]对 $\bar{\rho}=0.074$ 和 0.15 的 ALPORAS 进行了应变率范围为 $4 \times 10^2 \sim 2.5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 的动态压缩实验并与准静态实验结果进行了比较,他们认为这种泡沫铝合金的应力应变曲线是应变率相关的,而且相对密度高的材料应变率效应更加明显。Mukai 等^[4]通过 SHPB 实验得到了相对密度为 $\bar{\rho}_1=0.106$ 和 $\bar{\rho}_2=0.155$ 的 ALPORAS 的应力应变曲线,发现其平台应力具有明显的应变率敏感性,但它随材料相对密度的减小而增大。与此同时, Deshpande 和 Fleck^[5]对另一种商业闭孔泡沫铝合金 Alulight(Al-Mg-Si)进行了类似的实验,其相对密度为 $\bar{\rho}=0.16 \sim 0.31$,实验应变率范围为 $1 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$,结果表明平台应力对应变率是不敏感的。Hall 等^[6]对基体材料为 6061 铝合金、相对密度 $\bar{\rho}=0.126 \sim 0.34$ 的一种

* 收稿日期: 2007-04-08; 修回日期: 2007-06-16

作者简介: 刘耀东(1982—),男,博士研究生,主要从事多孔金属动态力学行为方面的研究。E-mail:andyustc@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 虞吉林(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事材料和结构冲击动力学方面的研究。E-mail:jlyu@ustc.edu.cn

闭孔泡沫铝合金在应变率范围 $1.5 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 的实验研究也得出类似的结论,即流动应力没有应变率敏感性。对于开孔泡沫金属同样存在类似的矛盾。Lankford 和 Danneman^[7]考察了一种商业开孔泡沫铝合金 Duocel(6101-T6)的压缩行为,发现其压缩强度在应变率为 $1 \times 10^{-3} \sim 1.2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 范围内不依赖于加载速率。Deshpande、Fleck^[5]和 Lee 等^[8]采用不同的实验技术也对 $\bar{\rho}=0.07$ 的 Duocel 泡沫进行了静态压缩实验,他们也认为 Duocel 泡沫的平台应力无应变率效应。Wang 等^[9]对 $\bar{\rho}=0.25 \sim 0.30$ 、两种不同孔径的开孔泡沫铝合金(Al-Mg-Si-Fe)进行了准静态和动态实验,也得出类似结论,认为屈服应力和吸能大小表现出轻微的应变率依赖性。但是,Kanahashi 等^[10]对用浇铸技术制造的超低密度($\bar{\rho}=0.03 \sim 0.06$)开孔 SG91A 泡沫铝合金(Al-Si-Mg-Fe-Mn)的动态压缩实验发现,当应变率为 $1.4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 时这种开孔泡沫铝合金的平台应力比准静态($1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)提高 60%。

针对这些分歧,一些学者对泡沫金属材料的动态力学行为进行了较为深入的研究。Tan 等^[11]采用直接撞击技术对一种闭孔泡沫 Al-Si-Mg 合金的压缩行为进行了实验研究,其速度范围从 10 m/s 到 210 m/s。他们发现泡沫材料的塑性崩塌应力(Plastic Collapse Stress,即塑性强度)随冲击速度的提高而提高,并把它归结为微惯性效应;而平台应力在低速时对冲击速度不敏感,但在高速冲击时迅速上升。他们认为,这反映了泡沫金属材料塑性崩塌应力和平台应力的速度效应而不是应变率效应,并提出了一个一维“稳态激波”模型来描述高速碰撞下泡沫金属的逐层崩塌行为^[12]。

通常认为,铝合金材料本身是应变率不敏感的。因此,铝合金多孔材料动态力学行为中出现的速率敏感性只能来源于材料微结构的多孔性和冲击载荷的影响。但是,考虑到金属基体中应力波的传播速度为百米每秒到千米每秒量级,而泡沫金属的胞元直径一般为毫米量级,从数量级看,只有当应变率与 10^5 s^{-1} 相当或更高时,由材料微结构引起的速率效应才比较明显。而文献中所报告的实验结果,其应变率多小于此值。微结构的多孔性造成速率敏感性的其它机理还有胞内气体的压缩(对闭孔材料)、变形破坏机理的改变等,但其影响可能并不显著^[5,11]。因此,动载荷可能是造成泡沫金属材料速率效应的主要因素。特别是在冲击速度较高时,由于惯性,试件的变形均匀性也是值得研究的问题。

为了考察惯性对多孔金属材料动态力学行为的影响,本研究采用数值模拟的方法对不同密度的二维不规则蜂窝在不同速度下的冲击压缩行为进行了研究,以期得到惯性与多孔金属材料速率效应的关系及其对材料的动态应力应变关系和平台应力的影响。

2 数值模拟

2.1 二维随机 Voronoi 技术

为了得到不规则的二维蜂窝构型,我们采用了随机 Voronoi 技术。在给定面积为 A_0 的区域上随机撒下 N 个点,任意两点的距离 δ_i 不小于一给定的距离 δ ,这 N 个点最终成为 N 个多边形或细胞核的中心,而形成多边形的方法是:选定某一点为参考点(通常是第一个点 N_1),以该点做与其它点的连线,再做这些连线的垂直平分线,这些垂直平分线必然相交,只有那些围绕该参考点的垂直平分线才构成需要的多边形。这样的多边形有一个特点,即该多边形内的所有点比它以外的任一点都更加靠近自己的细胞核,换句话说,这个多边形只包含一个细胞核,不可能有第二个细胞核存在。同时,为确保形成的图形是周期性 Voronoi 结构,应把 A_0 内 N 个点复制到邻近的 8 个同样大小的区域内(九宫格)以形成一个大的 Voronoi 图形,最后再删除 A_0 以外的图形,从而 A_0 平面上是周期性图形。图 1 给出的就是用二维随机 Voronoi 技术生成的蜂窝。

二维随机 Voronoi 技术生成的蜂窝的不规则性可以定义为

$$k = 1 - \delta/\delta_0 \quad (1)$$

式中: δ 是 Voronoi 蜂窝中任两个细胞核距离的最小值,而

$$\delta_0 = \sqrt{2A_0/\sqrt{3}N} \quad (2)$$

表示对给定面积 A_0 的平面上的正六边形蜂窝结构,任意两相邻的细胞核之间的距离^[13]。本文中 k 取 0.45,采用的样本如图 1(b)所示。

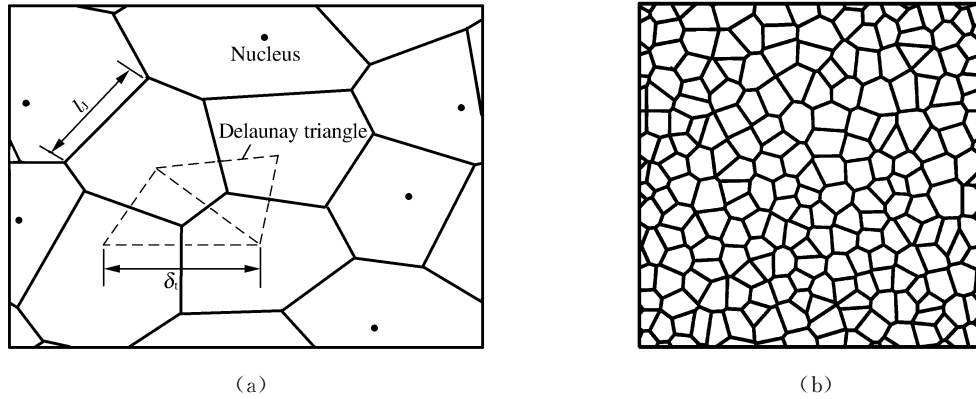


图 1 二维随机 Voronoi 技术:(a) 网格的形成;(b) $k=0.45$ 的一个样本
Fig.1 2D random Voronoi technique:(a) Formation of the grid,(b) A sample with $k=0.45$

2.2 有限元模型

在我们的有限元模型中,假设蜂窝的胞壁是弹性-理想塑性材料,其杨氏模量 E 为 66 GPa,屈服应力 σ_{ys} 为 175 MPa,泊松比 ν 为 0.3。

Voronoi 蜂窝的相对密度可表示为

$$\bar{\rho} = \rho^* / \rho_s = \frac{h}{L_1 L_2} \sum L_i \quad (3)$$

式中: ρ^* 是蜂窝结构的密度, ρ_s 是蜂窝胞壁材料的密度, h 是胞壁的厚度, L_i 是第 i 个胞壁的长度, L_1 、 L_2 分别是整个蜂窝试件的宽度和高度^[13]。

本文中取 $N=200$ 、 $L_1=L_2=100$ mm。胞壁的厚度取 0.26、0.36 和 0.48 mm 3 种情况,对应的相对密度 $\bar{\rho}$ 分别为 0.073、0.1 和 0.135。胞壁棱长上平均划分 3 个 S4R 单元(4 节点减缩积分的壳单元),单元横截面上有 5 个积分点。为研究惯性对蜂窝结构力学行为的影响,基体密度 ρ_s 除了取 2.7 Mg/m³ 外,还人为地假定了 3 种密度:0.9、0.3 和 0.1 Mg/m³,采用 ABAQUS 有限元软件对不同速度下蜂窝的压缩进行了数值模拟。

3 计算结果和讨论

3.1 3 种变形模式

蜂窝在横向冲击压缩下会出现 3 种变形模式,如图 2 所示,其中蜂窝的基体密度 ρ_s 为 2.7 Mg/m³,相对密度 $\bar{\rho}$ 为 0.1。3 种变形模式对应的冲击压缩速度分别是 10、60 和 180 m/s。当冲击速度比较低时,剪切变形带随机分布,蜂窝的宏观变形基本均匀,我们称之为准静态模式。当冲击速度很高时,蜂窝几乎是逐层崩塌,在冲击面一侧形成很窄的剪切带,称之为动态模式;而当速度介于准静态模式与动态模式两者之间时,剪切变形带比较集中于冲击侧,形成较为局部的剪切带,称之为过渡模式,详见文献[14]。对不同的基体密度和蜂窝相对密度,冲击压缩时都会出现此 3 种变形模式,但各变形模式之间的临界压缩速度可能不一样。

3.2 宏观应力应变曲线

图 3 是 3 种不同模式下蜂窝试件冲击面和支撑面的工程应力与名义工程应变的关系曲线。从图中可以看出,准静态模式中冲击面的工程应力和支撑面的工程应力基本相同。随着冲击速度的提高,两者的差距逐渐变大。在动态模式下,尽管冲击面上出现很高的应力,支撑面开始基本上未受载荷,后期也仅与低速冲击时的平台应力接近,其应力应变曲线仅出现几个小的波峰(图 3(c)),分析可知这是由于应力波在支撑面反射造成的,但因为波在蜂窝结构中的几何弥散,其应力相对很弱。

当蜂窝为准静态变形模式时,试件中的应力和应变是宏观均匀的,可以直接得到它的宏观应力应变

曲线。图 4(a)给出了相对密度 $\bar{\rho}=0.1$,不同基体密度的试件在不同冲击压缩速度下的应力应变曲线。这些曲线基本重合,表明惯性效应是微弱的,也就是说,惯性效应对试件的应力应变曲线没有影响。图 4(b)中蜂窝取 3 种胞壁厚度(0.26、0.36 和 0.48 mm),对应 3 种相对密度。在相同的冲击压缩速度下($v=1$ m/s),随着相对密度的增加,应力平台也显著提高。 $\bar{\rho}=0.135$ 和 $\bar{\rho}=0.1$ 的平台应力比 $\bar{\rho}=0.073$ 时的平台应力分别提高了 281.5% 和 105.7%,可见蜂窝材料的相对密度即胞壁厚度对平台应力的影响很大。

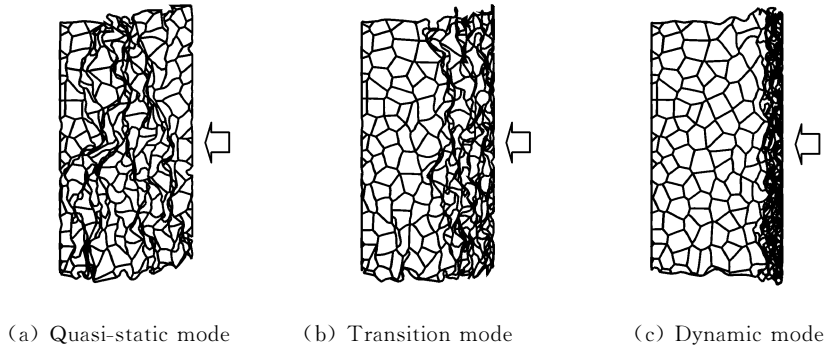


图 2 3 种变形模式

Fig. 2 Three deformation modes

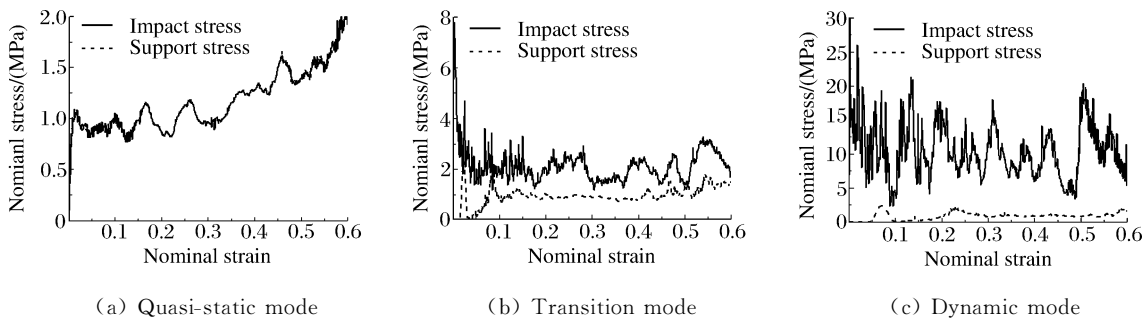


图 3 3 种模式下冲击面和支撑面的应力应变曲线图

Fig. 3 Stress-strain curves on the impact surface and support surface under three deformation modes

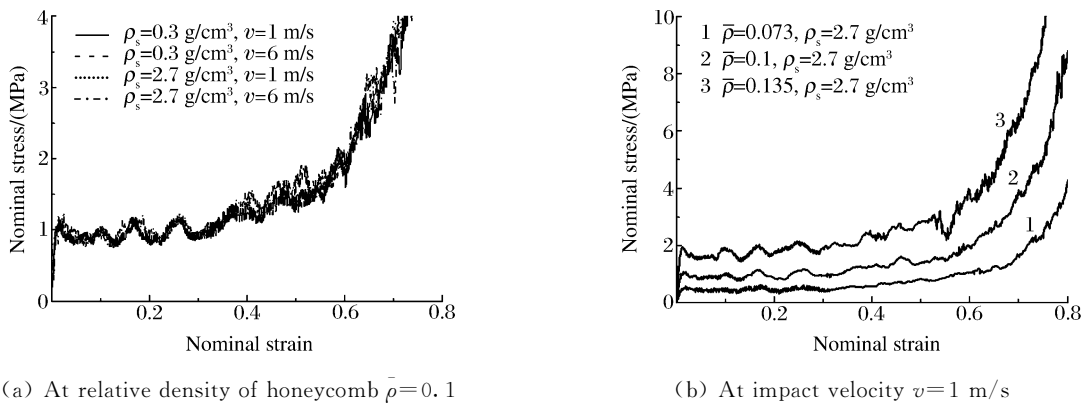


图 4 准静态模式时的应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves under quasi-static mode

3.3 平台应力

为了进一步对不同速度下的平台应力进行定量比较,参照文献[15],定义压实应变 ϵ_D 为对应于

$\max(\int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon/\sigma)$ 的工程应变,进而定义平台应力为

$$\sigma_p = \frac{1}{\epsilon_D - \epsilon_y} \int_{\epsilon_y}^{\epsilon_D} \sigma d\epsilon \quad (4)$$

式中: ϵ_y 是屈服应变,本文中取 $\epsilon_y = 0.02$ 。

根据公式(4)可以计算出各种速度下由冲击面的工程应力历史得到的平台应力 σ_{pi} ;同时,在同一应变范围内对支撑面的工程应力求平均值,可以得出各相应速度下在支撑面的平均应力 σ_{ps} ,分别如图 5(a)和图 5(b)所示,图中蜂窝的基体密度均为 $\rho_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$ 。作为比较,在图 5(a)中增加了另一种基体密度 $\rho_s = 0.3 \text{ g/cm}^3$ 的计算结果。比较图 5(a)和图 5(b)可见,尽管冲击面的平均应力(即平台应力)随冲击压缩速度的上升而大大提高,支撑面的平均应力却基本上保持不变。这从另一个侧面反映了过渡模式和动态模式下变形和应力分布的不均匀性。

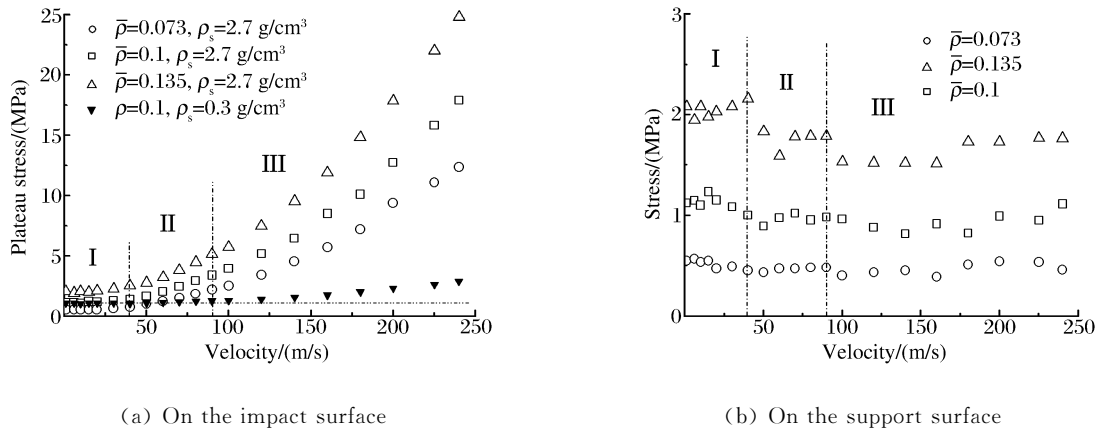


图 5 不同相对密度下平均应力与冲击压缩速度的关系

Fig. 5 Relationship between the mean stress and the impact velocity of honeycombs with different relative densities

根据不同冲击压缩速度下试件的变形模式,在图 5 中可以划分出 3 个区域 I、II、III,分别对应于图 2 中的 3 种变形模式,当基体密度 $\rho_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$ 时,相邻模式间的临界速度分别是 40 m/s 和 90 m/s,基本上与蜂窝的相对密度无关。由图 5(a)可以看出,在同一相对密度下,当试件进入过渡模式和动态模式时,平台应力随着冲击压缩速度的增加明显提高。相对密度越大,平台应力越高;即胞壁越厚,平台应力越高。当基体密度为 $\rho_s = 0.3 \text{ g/cm}^3$ 时,平台应力随速度的增加明显变慢,以准静态模式时的平台应力为准(图中的水平虚线),当相对密度 $\bar{\rho} = 0.1$ 时, $\rho_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$ 和 $\rho_s = 0.3 \text{ g/cm}^3$ 两种基体密度的蜂窝在冲击压缩速度为 100 m/s 时的平台应力分别提高了 254% 和 20%。另一方面,数值模拟结果表明,当基体密度降低时,相邻模式间的临界速度大大提高。当基体密度为 $\rho_s = 0.3 \text{ g/cm}^3$ 时,准静态模式与过渡模式间的临界速度提高到 100 m/s。而当 $\rho_s = 0.1 \text{ g/cm}^3$ 时,即使冲击压缩速度高达 200 m/s,试件仍处于准静态模式。由此可见,惯性效应是导致平台应力显著提高的主要因素。随着冲击压缩速度的提高,当试件变形为过渡模式和动态模式时,尽管蜂窝材料的宏观应力应变曲线并没有发生变化,但由于惯性效应,试件中的宏观变形不再均匀。处于冲击面附近的材料的宏观平均应变远远高于试件总体平均应变,处于应力应变曲线的压实应变侧,因此平均应力很高;而处于支撑面附近的材料,其平均应变处于应力应变曲线的初始屈服段,平均应力接近于准静态模式的平台应力。由于应力波效应,冲击压缩速度高时,有时 σ_{ps} 甚至可能有所降低,如图 5(b)所示。

3.4 关于泡沫金属应变率敏感性实验测量结果的矛盾

对于文献中关于泡沫金属应变率敏感性实验测量结果的矛盾, Lee 等^[8]认为主要存在以下几个因素:对强度提高机制的理解、重要参数(如压实应变和平台应力)的定义以及实验技术的选择。从我们的“数值实验”结果看,惯性对平台应力的影响在试件变形模式为过渡模式或动态模式时是非常明显的。

一旦试件中的宏观变形不均匀,平台应力就会提高。但如果基体材料对应变率不敏感,这种提高与其说是泡沫金属材料的应变率效应,还不如说是材料动态变形时的惯性效应。因为材料的宏观应力应变曲线并没有改变,只是由于宏观应变不均匀,冲击面处于应力应变曲线的高应变端。需要澄清的是,文献报道的动态实验中一些试件的变形属于过渡模式,即使对同一种材料,由于试件大小尺寸、相对密度、微结构形态、加载方法等的差别,可能导致试件在动态实验时应变均匀程度不同,甚至变形模式不同,从而惯性效应的影响程度也不同。这必然导致不同实验者所得实验结果的差异。因此,泡沫金属动态实验中试件变形的不均匀程度是一个值得十分关注的问题。

4 结 论

本研究采用 ABAQUS 有限元软件数值模拟了二维 Voronoi 蜂窝结构的动态压缩响应。随着冲击速度的提高,蜂窝结构的动态压缩变形依次表现为准静态模式、过渡模式和动态模式。

必须区分多孔金属材料动态变形时应力应变关系的应变率敏感性和平台应力的速率敏感性。我们的数值实验结果表明,基体材料对应变率不敏感时,蜂窝结构的宏观应力应变关系也不存在应变率敏感性。只要试件变形是宏观均匀的,其宏观应力应变曲线仅依赖于基体材料的应力应变曲线和蜂窝材料的相对密度,而与冲击压缩速度和基体材料密度无关。但是,随着冲击速度的提高,测量到的蜂窝平台应力将会大大提高,这主要是由惯性效应导致试件宏观变形局部化而引起的。当速度很大时,惯性效应对平台应力提高的影响将远远超过材料相对密度增大对平台应力提高的影响。

本研究所得的结果对理解文献中关于泡沫金属动态实验测量结果的矛盾有一定的启发。在对多孔金属材料进行动力学行为实验测量时,必须监测试件变形的均匀性,将多孔金属材料本身的应变率效应和试件动态变形中的惯性效应加以区别。

References:

- [1] Mukai T, Kanahashi H, Miyoshi T, et al. Experimental Study of Energy Absorption in a Close-Celled Aluminum Foam under Dynamic Loading [J]. Scripta Materialia, 1999, 40: 921-927.
- [2] Paul A, Ramamurty U. Strain Rate Sensitivity of a Closed-Cell Aluminum Foam [J]. Mater Sci Eng, 2000, A281: 1-7.
- [3] Dannemann K A, Lankford J. High Strain Rate Compression of Closed-Cell Aluminium Foams [J]. Mater Sci Eng, 2000, A293: 157-164.
- [4] Mukai T, Miyoshi T, Nakano S, et al. Compressive Response of a Closed-Cell Aluminum Foam at High Strain Rate [J]. Scripta Materialia, 2005, 54: 533-537.
- [5] Deshpande V S, Fleck N A. High Strain Rate Compressive Behaviour of Aluminium alloy Foams [J]. Int J Impact Eng, 2000, 24: 277-298.
- [6] Hall I W, Guden M, Yu C J. Crushing of Aluminum Closed Cell Foams: Density and Strain Rate Effects [J]. Scripta Materialia, 2000, 43: 515-521.
- [7] Lankford J, Danneman K A. Strain Rate Effects in Porous Materials [A]// Swartz D S, Shih D S, Evans A G, et al. Porous and Cellular Materials for Structural Applications. Materials Research Society Proceedings [C]. 1998, 521: 103-108.
- [8] Lee S, Barthelat F, Moldovan N, et al. Deformation Rate Effects on Failure Modes of Open-Cell Al Foams and Textile Cellular Materials [J]. Inter J Solids Struct, 2006, 43: 53-73.
- [9] Wang Z H, Ma H W, Zhao L M, et al. Studies on the Dynamic Compressive Properties of Open-Cell Aluminum Alloy Foams [J]. Scripta Materialia, 2006, 54: 83-87.
- [10] Kanahashi H, Mukai T, Yamada Y, et al. Dynamic Compression of an Ultra-Low Density Aluminium Foam [J]. Mater Sci Eng, 2000, A280: 349-353.

- [11] Tan P J, Reid S R, Harrigan J J, et al. Dynamic Compressive Strength Properties of Aluminium Foams: Part I — Experimental Data and Observations [J]. *J Mech Phys Solids*, 2005, 53: 2174-2205.
- [12] Tan P J, Reid S R, Harrigan J J, et al. Dynamic Compressive Strength Properties of Aluminium Foams: Part II — ‘Shock’ Theory and Comparison with Experimental Data and Numerical Models [J]. *J Mech Phys Solids*, 2005, 53: 2206-2230.
- [13] Zhu H X, Thorpe S M, Windle A H. The Geometrical Properties of Irregular Two-Dimensional Voronoi Tessellations [J]. *Philos Mag A*, 2001, 81(12): 2765-83.
- [14] Zheng Z J, Yu J L, Li J R. Dynamic Crushing of 2D Cellular Structures: A Finite Element Study [J]. *Int J Impact Eng*, 2005, 32(1-4): 650-664.
- [15] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids: Structure and Properties*. 2nd ed [M]. Oxford: Pergamon Press, 1997.

Effect of Inertia on the Dynamic Behavior of Cellular Metal

LIU Yao-Dong, YU Ji-Lin, ZHENG Zhi-Jun

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Although the mechanical property of metal foams has been widely studied, there are some conflicting conclusions on the strain-rate effect and the inertia effect of metallic foams. For a deep understanding of the role of inertia in the dynamic response of cellular metals, finite element method is used to study the dynamic compression of 2D Voronoi honeycombs. Three deformation modes are formulated. “Numerical experiments” are conducted by changing the density of wall material and the impact velocity. Corresponding macroscopically-averaged stress-strain curves measured on the impact surface and support surface and the plateau stress of the “specimens” are obtained. According to the simulation results, the influence of inertia is analyzed. It is found that the inertia of the honeycomb has no effect on the stress-strain curve as the macroscopic deformation is homogeneous. However, the inertia effect will result in nonuniform deformation as the impact velocity is high, and thus the plateau stress is obviously increased.

Key words: metallic foam; Voronoi honeycomb; inertia effect; strain-rate effect