

DOI: 10.7652/xjtuxb201311019

泡沫金属在冲击载荷下的能量吸收特性

张健, 赵桂平, 卢天健

(西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 基于显微 CT 扫描信息, 建立泡沫金属材料二维细观有限元模型, 考虑不规则胞孔的不均匀分布, 根据试验结果拟合孔壁材料的弹塑性本构参数, 分析了泡沫金属材料在动态压缩过程中的变形特性和弹塑性波的传播, 重点讨论了泡沫金属作为防护材料的吸能机理和吸能特性。结果表明, 对于相对密度为 0.3 的泡沫金属, 在高速压缩至应变 0.8 的整个过程中, 塑性波在泡沫金属试件中发生 2 次反射, 试件经历 3 次压缩过程。相应地, 泡沫金属的动能-应变曲线可以分为初始上升段、下降段和二次上升段 3 个阶段。内能和总能量变化曲线均单调增加。动能在第一次压缩结束时达到极大值, 在第二次压缩结束时达到极小值; 冲击速度越大, 动能、内能和总能量均增长越快, 动能在总能量中的比例逐渐增加, 而内能在总能量中的比例减小。

关键词: 泡沫金属; 动态压缩; 弹塑性波的传播; 细观有限元模型

中图分类号: O347 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)11-0105-08

Energy Absorption Behaviour of Metallic Cellular Materials Under Impact Loading

ZHANG Jian, ZHAO Guiping, LU Tianjian

(State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A two-dimensional finite element model is created from a tomographic image of aluminum foams, which represents the cell shape and geometric distribution of real foams. To determine the mechanical properties of cell-walled material, the uniaxial stress versus strain curve, predicted numerically for the aluminum foam, is fitted to that measured experimentally. The mechanism of compressive deformation, shock wave propagation and the energy absorption capacity of metallic cellular materials under high speed compression are mainly discussed. When the specimen of metallic cellular material with relative density 0.3 is compressed up to the normal strain of 0.8 under impact loading, the plastic wave reflects twice in the specimen, and the specimen undergoes three compression processes. Accordingly, the simulated kinetic energy curves of the metallic cellular material under high impact velocities can be divided into three segments: the initial rise segment, the descent segment and the second rise segment. The internal energy and total energy curves show monotone increasing for different impact velocities. The kinetic energy curves reach maximum values and minimum values at the end of first and second compression, respectively. As for high velocity impact, the slope values of the kinetic energy, internal energy and total energy curves increase. Simultaneously, the proportion of

收稿日期: 2013-02-16。 作者简介: 张健(1981—),男,博士生;赵桂平(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究计划资助项目(2011CB610305);国家自然科学基金资助项目(11021202);陕西省自然科学基金资助项目(2011JM1012)。

网络出版时间: 2013-09-06

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130906.1703.002.html>

kinetic energy in total energy increases whilst the proportion of internal energy decreases with the increase in compression velocity.

Keywords: metallic cellular material; high speed compression; shock wave propagation; mesoscopic finite element model

泡沫金属在压缩载荷作用下既能承受很大的变形,又能保持相对恒定的应力水平,是理想的轻质吸能防护材料。在实际应用中,这种防护材料覆盖在被保护结构的外表面,受到冲击载荷时只能传递允许的脉冲强度到被保护结构上,同时在承受冲击载荷的时间内不能达到密实状态,从而保证被保护结构的安全服役。目前,泡沫金属已经应用于航天着陆器、汽车防撞结构、军用汽车的防爆底板(防止地雷袭击)以及处置疑似爆炸物的防爆罐等领域。

很多学者发现,泡沫金属在高速冲击下表现出明显不同于静态时的力学性能,例如:Fraunhofer 泡沫铝以 26 m/s 的速度冲击刚性墙时几乎不发生变形,而在 76 m/s 冲击时则出现了明显的波阵面^[1];对于大孔径和小孔径 2 种 Hydro 泡沫铝,当冲击速度分别在 42 m/s 和 108 m/s 以下时,应力增强现象不是很明显,但是超过了这个临界速度,变形就会表现出明显的冲击特征^[2-3];在冲击速度为 55 m/s 时,Alporas 泡沫铝和镍空心球团在波阵面前后应力的跳跃与初始应力平台之比达 60%,而 Cymat 泡沫铝和 5056 铝蜂窝却没有明显的应力提升^[4];Alporas 泡沫铝承受冲击和爆炸载荷的试验结果表明,当冲击速度超过 60 m/s 时,可以观察到明显的波阵面,而塑胶炸药起爆所产生的脉冲并没有使泡沫铝产生冲击变形模式^[5]。

也有一些学者对泡沫金属的动态压缩行为进行了理论分析和数值模拟,例如有人使用连续性模型,通过设定材料本构参数来考虑可压缩性^[1, 6-7];为了模拟泡沫金属材料的非均匀分布,有人采用了二维 Voronoi 细观有限元模型^[8-10]和三维 Voronoi 细观有限元模型^[11-12],但由于模型和实际泡沫材料的孔型和分布的差异,都没有给出与试验结果的对比如验证。理论分析大多以一维冲击波在泡沫材料中传播的理论为框架,如 Reid 等假定泡沫材料一维本构关系为完全刚塑性锁死(rigid-perfectly plastic-locking, R-P-P-L)模型^[13],Pattofatto 等拟合了刚性幂硬化(rigid power-law hardening, R-PLH)模型^[6],Zheng 等使用了刚性线性塑性强化锁死(rigid linear-hardening plastic-locking, R-LHP-L)模型^[14],然而这些模型均忽略了材料在冲击过程中的

弹性变形阶段。Lopatnikov 等考虑了泡沫材料中弹性阶段的变形,发展了理想弹塑性锁死(elastic-perfectly plastic-rigid, E-P-P-R)模型^[1, 15-16]。

由于试验结果有很大的离散性,同时,试验中无法清楚地观测到试件高速变形的过程,也很难测量冲击载荷下泡沫金属的吸能历程,而二维/三维 Voronoi 模型又不能完全表现泡沫金属实际孔型和孔壁材料的分布,因此,本文基于显微 CT 扫描信息,建立了泡沫金属材料二维细观有限元模型,考虑了不规则胞孔的不均匀分布,拟合了基体材料的弹塑性本构参数,定量分析了泡沫金属材料在动态压缩过程中的变形特性和弹塑性波的传播,重点研究了泡沫金属作为防护吸能材料的吸能机理和吸能特性,以期为泡沫金属的吸能防护设计提供参考依据。

1 泡沫金属的有限元模型

如图 1 所示,根据闭孔泡沫铝(见图 1a)一个截面上实际胞孔的形状和分布,建立泡沫金属材料二维细观有限元模型试件(见图 1c)^[17-18],其相对密度分布如图 1b 所示,平均相对密度为 0.3,最大值为 0.34,分布在沿高度 8~10 mm 处,最小值为 0.25,分布在沿高度 2~4 mm 处。模型的平面尺寸为 10 mm×10 mm,厚度为 0.02 mm(沿厚度方向的一个单元),具有约束平面外自由度。采用 8 节点六面体单元,单元尺寸为 0.04 mm,总单元数量接近 20 000 个。利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对泡沫金属的压缩性能进行数值模拟,计算时试件夹在两个刚性平面之间,上刚性面静止,下刚性面以恒定速率对有限元模型进行压缩加载,达到设定最大压缩量 8 mm 时终止加载,以静止端刚性面的法向反力计算试件的名义应力-应变曲线。采用单面接触算法,考虑孔壁间所有可能发生的接触。试件与刚性面间的摩擦系数象征性地取为 0.01,以模拟试验中充分润滑的状态。为了精确地考虑试件的实际质量和惯性效应的影响,计算中均没有使用质量缩放。

假定泡沫金属的基体材料为铝合金,密度为 2 700 kg/m³,本构模型选为内置的弹塑性模型(*MAT_PLASTIC_KINEMATIC)^[19],取弹性模

量为 70 GPa,泊松比为 0.3。为了在一定程度上定量研究泡沫金属的动态压缩行为,采用图 1 所示的二维细观有限元模型进行准静态单轴压缩模拟计算,结果发现,当基体材料本构参数中的屈服应力和强化模量分别为 132 MPa 和 0 MPa 时,该细观有限元模型的计算结果与泡沫铝试件(见图 1a)的单轴准静态压缩试验结果^[17]吻合较好,其名义应力-应变曲线见图 2。本文的二维细观有限元模型相当于平面应变问题,名义应力 $\sigma = F/A$,名义应变 $\epsilon = vt/h$,其中 F 为静止端刚性面的法向反力, A 为初始面内截面的名义面积(10 mm×0.02 mm), h 为试件的初始高度(10 mm), v 为加载速度, t 为加载时间。

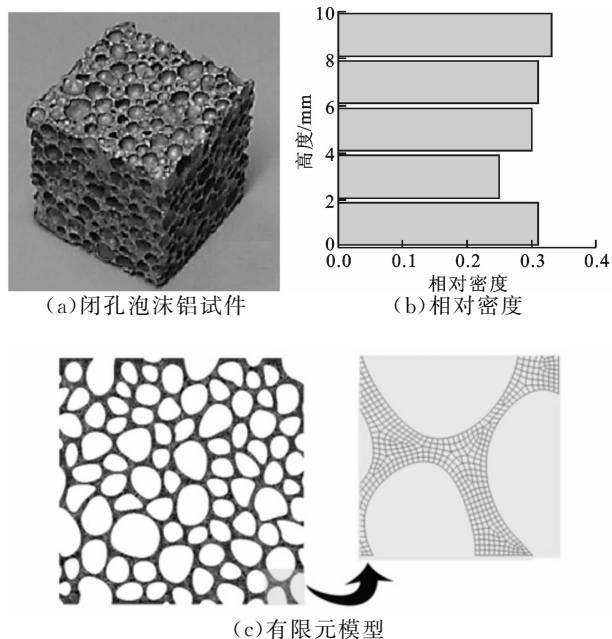


图 1 泡沫金属的二维细观有限元模型

需要指出的是,Voronoi 模型采用的壳单元假定其厚度远小于另外 2 维的尺寸,故仅适用于孔壁较薄的低相对密度泡沫铝。对中高相对密度泡沫铝而言,一般需要采用实体单元的离散模型^[20-21]。例如,Jeon 等建立了闭孔泡沫铝的离散有限元模型^[22-23],可以真实地反映实际闭孔泡沫铝的几何构型,但该方法的建模过程非常复杂,在实际研究中很少采用。实际上,建立真实闭孔泡沫铝的三维细观有限元模型本身就是一个难点,再加上孔壁材料本构参数难以确定,使定量描述不易实现。本文针对闭孔泡沫铝建立的二维细观有限元模型虽然有一定的局限性,但它一方面可反映不规则胞孔的不均匀分布,另一方面可观察泡沫铝孔壁坍塌和密实化变形过程(见图 3),故在一定意义上可定量分析泡沫金属在动态单轴压缩过程中的变形特性。此外,根

据试验结果拟合的基体材料的弹塑性本构参数,使得该细观模型的计算和泡沫铝试件的单轴准静态压缩试验结果吻合较好(见图 2)。

另外需要指出的是,Jeon 等通过试验证明,如果不同尺寸(从 50 mm×50 mm×50 mm 到 8 mm×8 mm×8 mm)的闭孔泡沫铝压缩试件无孔结构上的缺陷,如耦合胞孔、缺失胞孔和坍塌胞孔等,较小的闭孔泡沫铝试件在单轴压缩时可表现出与大块泡沫铝试件完全相同的应力-应变曲线,故可采用较小的有限元模型来研究闭孔泡沫铝的变形和破坏机理^[24]。本文采用的泡沫铝单轴压缩试件为边长 10 mm 的立方体(见图 1a),根据其截面建立的二维细观有限元模型平面尺寸为 10 mm×10 mm(见图 1c),通过调整孔壁材料的本构参数,可使计算结果与泡沫铝的单轴准静态压缩试验结果吻合较好(如图 2 所示)。

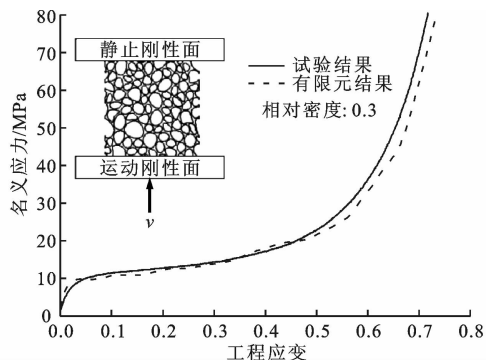


图 2 泡沫金属单轴压缩的名义应力-应变曲线

2 泡沫金属的冲击变形模式

通过计算,得到相对密度为 0.3 的泡沫金属在不同加载速度下的压缩变形过程,如图 3 所示,从中可以看到 2 种截然不同的变形模式——准静态模式(图 3a)和动态模式(图 3b、3c)。

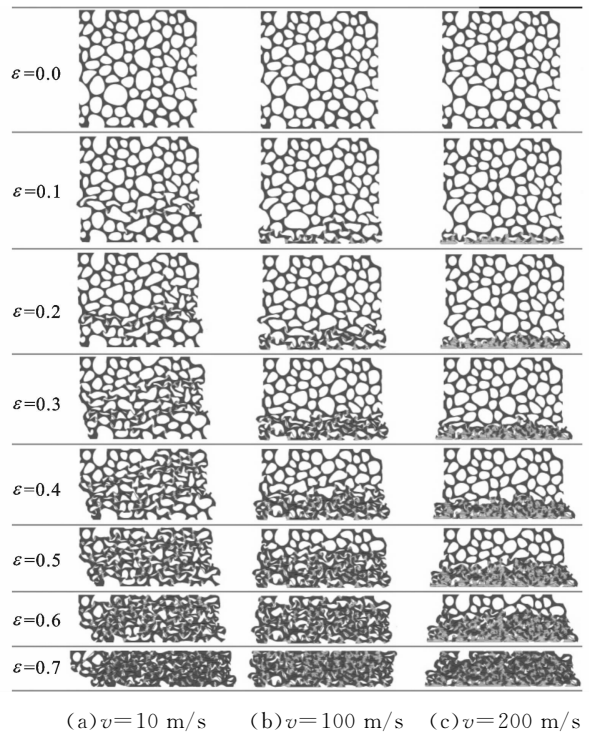
当加载速度为 10 m/s 时,泡沫金属的变形模式与准静态压缩时相同,其塑性屈曲首先出现在大胞孔的孔壁中段,这是由于泡沫金属的胞孔分布不均匀,大胞孔孔壁的长细比最大,而孔壁中段部分又属于薄弱截面。例如,在图 3a 应变 $\epsilon = 0.0$ 对应的图中,屈曲产生塑性铰的区域为一个不规则的变形带,宏观上主要集中在相对密度分布最小的区域,沿高度 2~4 mm 处。随着压缩量的增大,变形带中胞孔孔壁间发生接触,接触点相当于给薄弱孔壁提供了支撑,减少了薄弱孔壁的计算长度,其承载力便得到提高,这时又有相对薄弱的孔壁出现塑性变形,形成

另一个变形带(见图 3a 中应变 $\epsilon=0.3$ 对应的图),在这样的过程中,泡沫金属的应力-应变曲线即形成一个近似恒定的应力平台,直到几乎所有的孔壁都发生接触(见图 3a 中应变 $\epsilon=0.6$ 对应的图),坍塌过程结束,试件变形整体上进入密实化阶段,孔壁间的接触面进一步增大,承载力进一步提高,试件发生明显的侧向变形。

当加载速度为 200 m/s 时,泡沫金属的变形模式与准静态压缩时完全不同,试件在动态加载面附近首先出现孔壁坍塌(见图 3c 中 $\epsilon=0.1$ 对应的图),并且发生局部密实化现象,试件变形很不均匀,存在一个明显的波阵面把试件分为 2 个区域,即塑性变形区和弹性变形区。随着压缩量的增大,塑性变形区域向静止面扩展(见图 3c 中 $\epsilon=0.1\sim 0.6$ 对应的图),这个过程就是塑性波在泡沫金属中传播的过程,直到压缩应变达到 0.7 左右,塑性波阵面到达静止面,弹性变形区完全消失,此时试件已基本处于密实状态(见图 3c 中 $\epsilon=0.7$ 对应的图)。

当加载速度为 100 m/s 时,泡沫金属的变形也属于动态变形模式。从图 3b 可以看到:当 $\epsilon=0.1$ 时,试件产生的塑性铰明显多于加载速度为 10 m/s 时的情况,而且主要集中在动态加载端,并非是在试件材料分布相对薄弱的 2~4 mm 段;当 $\epsilon=0.6$ 时,塑性波阵面到达静止面。事实上,这时试件并未完全密实,在动态面继续压缩的过程中,没有完全密实的泡沫金属(见图 3b 中 $\epsilon=0.6$ 的图)又会重复图 3b 中 $\epsilon=0.1\sim 0.6$ 时的变形过程。对比图 3c 可以发现,其波阵面界限不是特别清楚,塑性变形区的密实化程度较低,而密实化应变有所减小,此时的变形模式处于准静态向动态转换的过渡阶段。

泡沫金属在冲击载荷下的变形模式改变取决于加载速度和材料塑性波速之间的关系,一些相关研究假定存在 2 个临界波速^[14,25-26]作为理论分析的前提。然而,本文的数值模拟表明,泡沫金属变形模式的改变是一个渐变的过程,未发现确定的临界波速,且材料的塑性波速与加载速度相关:加载速度越高,塑性波速越快。此外,文献[25]讨论了规律排布的六边形蜂窝结构沿面内 2 个方向动态压缩的变形模式,并给出了理论解释,而本文中泡沫金属不规则胞孔的不均匀分布增加了对该类问题进行理论分析的难度,目前只能粗略地将其变形模式分为准静态模式、动态模式及过渡模式。如何对本文观察到的泡沫金属变形模式的改变进行理论解释,将是后续研究的重点。



(a) $v=10$ m/s (b) $v=100$ m/s (c) $v=200$ m/s

图 3 不同加载速度时泡沫金属的变形图

3 泡沫金属的能量吸收特性

泡沫金属作为防护结构材料时,主要利用其吸能特性。为了研究冲击载荷下泡沫金属的吸能机理,我们计算分析了不同加载速度时泡沫金属的动能、内能、总能量的变化及动能和内能在总能量中的分配。在有限元计算中,内能定义为

$$I = \frac{1}{2} \mathbf{a}^T \mathbf{K} \mathbf{a}$$

动能定义为

$$K = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{a}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{a}}$$

式中: \mathbf{a} 为单元节点位移向量; \mathbf{K} 为单元刚度矩阵; \mathbf{M} 为单元质量矩阵。

总能量为动能和内能之和。本节定义所有能量均为单位体积吸收的能量。

3.1 动能

从图 4 可以看到,当压缩速度为 10 m/s 时(低速加载),泡沫金属变形过程中的动能一直都很小(接近于 0)。在高速加载情况下,泡沫金属的动能-应变曲线可以分为初始上升段、下降段和二次上升段 3 个阶段。这是由于泡沫金属的应变在压缩至 0.8 的整个过程中,塑性波在其中发生了 2 次反射。

塑性波在泡沫金属中的传播过程如图 5 所示。泡沫金属试件夹在 2 个刚性平面之间(见图 5a),上

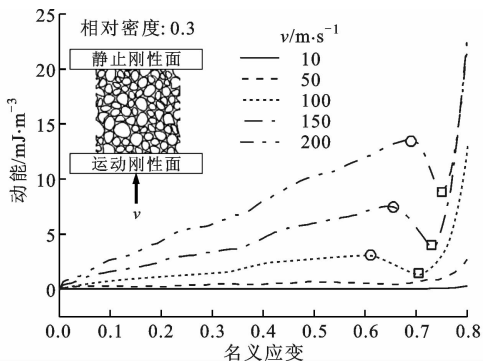


图 4 不同加载速度时泡沫金属的动能变化曲线

刚性面静止,下刚性面以恒定速率压缩加载。从图 3b、3c 中可以看到,高速压缩时塑性波首先产生于试件的加载端并向静止端传播,塑性波阵面把试件分为 2 个区域——已压缩区域和未压缩区域,如图 5b 所示,其中描述波阵面前、后的密度、应力和质点速度的参数符号分别为 ρ_0, σ_0, v_0 和 ρ_1, σ_1, v_1 。

假设泡沫金属在变形过程中质点的位移是连续的,根据质点运动的连续性条件,塑性波阵面前、后的状态应满足

$$\rho_1(v_{\text{plastic}} - v_1) = \rho_0(v_{\text{plastic}} - v_0) \quad (1)$$

式中: v_{plastic} 为泡沫金属的塑性波速。泡沫金属在第一次压缩过程中波前与波后的物理状态参量为:

$$\begin{aligned} \text{波前} \quad & v_0 = 0, \quad \rho_0 = \rho_0 \\ \text{波后} \quad & v_1 = v_{\text{impact}}, \quad \rho_1 = \rho_{\text{lock}} \end{aligned}$$

波前未压缩区域和上刚性面一样保持静止(速度为 0),波后已压缩区域以速度 v 向上运动,由于泡沫金属的塑性波速大于试件的压缩速度,越来越多的材料进入压缩区域,其动能变化曲线也因此逐渐升高。当塑性波阵面到达静止面时,试件全部进入压缩区域,动能达到极大值。此时,泡沫金属的密

度为高速压缩时的锁死密度 ρ_{lock} ,可以由式(1)得到

$$\rho_{\text{lock}} = \frac{\rho_0 v_{\text{plastic}}}{v_{\text{plastic}} - v} = \frac{\rho_0}{1 - v/v_{\text{plastic}}} \quad (2)$$

式中:定义动态锁死应变

$$\epsilon_{\text{lock}} = v/v_{\text{plastic}} \quad (3)$$

通过数值模拟分析发现,泡沫金属的动态锁死应变 ϵ_{lock} 是变化的,它与准静态加载下的密实应变 ϵ_D 有着本质的不同。直观上从图 3b 和 3c 中可以看到,冲击速度越大,泡沫金属所能达到的动态锁死应变就越大,塑性区越密实,材料的锁死密度 ρ_{lock} 也越大。由式(3)可知,动态锁死应变与冲击速度、塑性波速相关。问题的复杂性在于泡沫金属并不是理想的弹塑性材料,其塑性波速不是恒定的。 ϵ_{lock} 在图 4 中表现为动能达到极大值时的名义应变,在加载速度为 100、150 和 200 m/s 时的 ϵ_{lock} 值分别为 0.60、0.64 和 0.68,根据式(3)反算出泡沫金属材料的塑性波速分别为 167、234 和 294 m/s,即泡沫金属的塑性波速随着加载速度的增大而增大。

塑性波向上传播到静止刚性面后,由于反射转向下传播,反射后未完全密实的泡沫金属试件经历二次压缩过程。如图 5c 所示,和第一次压缩过程一样,塑性波阵面把试件分为已压缩和未压缩 2 个区域,这时波前与波后的物理状态参量为:波前状态 ρ_1, σ_1, v_1 ,波后状态 ρ_2, σ_2, v_2 。波前区域继续和下刚性面一起以加载速度 v 向上运动,而波后区域则和上刚性面一样保持静止(速度为 0)。经过第一次压缩的泡沫金属试件拥有更高的密度(锁死密度),并具有更高的塑性波速。随着压缩量的增大,越来越多的材料进入压缩区域而保持静止,动能变化曲线也因此逐渐下降。当塑性波阵面到达加载刚性面时,泡沫金属试件全部进入压缩区域,动能达到极小

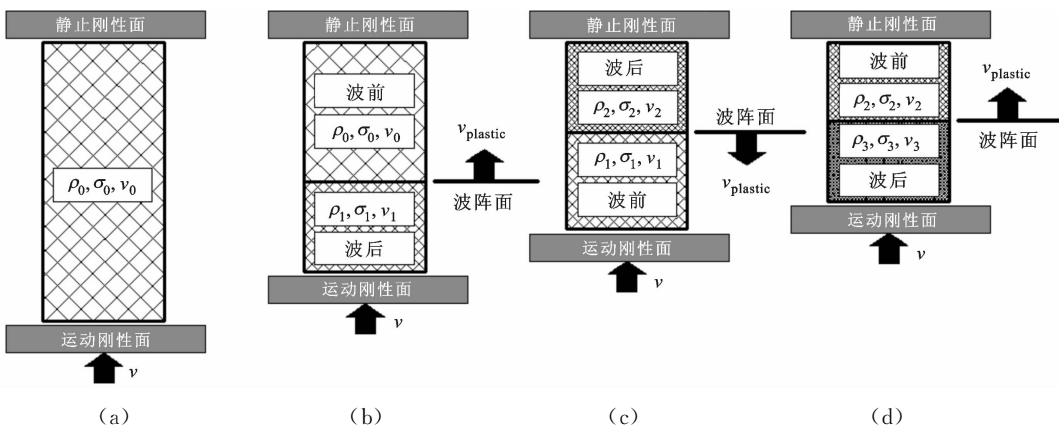


图 5 高速压缩时泡沫金属中冲击波传播示意图

值。在理想情况下,这时泡沫金属处于瞬时静止状态,动能应该为0,但从图4中可以看到,不同加载速度下的动能极小值均不为0,这是由于采用一维应力波理论分析时,忽略了泡沫金属在单轴压缩时存在一定的侧向变形。从图3中也可以看到,泡沫金属在高应变时会以一定速度向侧向流动,压缩速度越高,侧向流动的速度越大,拥有的动能极小值也越大。

经过2次压缩过程,泡沫金属已经比较密实,从图3中无法继续观测到泡沫金属的变形特征,但从图4中动能变化曲线的二次上升段推断,泡沫金属试件在应变达到0.8之前还要经历第三次压缩过程。如图5d所示,塑性波向下传播到加载刚性面后,再次发生反射继续向上传播,其传播状态和第一次压缩过程(图5b)一样。需要说明的是,经历了2次压缩过程的泡沫金属试件已经比较密实,在下刚性面的继续高速压缩下,试件材料迅速向侧向流动,由此反映出动能的快速增加。

我们主要关注泡沫金属高速压缩时动能变化的2个关键节点,即极大值(图4中用圆圈标注)、极小值(图4中用小矩形标注)及其相对应的应变值。动能在第一次压缩结束时达到极大值,在第二次压缩结束时达到极小值。随着压缩速度增大,动能的极大值和极小值相应增大,而达到极大值和极小值的应变值也变大,相应地,动能变化曲线的初始上升段变长,而下降段缩短。

3.2 内能

从图6可以看到,泡沫金属在不同速度压缩过程中的内能随压缩应变增加而单调增加,在高速加载时直观上近似呈三折线型,转折点的应变为第一次和第二次压缩过程(见图5b、5c)结束时的动态锁死应变。

从图5b可以看到,高速加载时塑性波向静止面传播的过程中,试件波后部分发生塑性变形,而波前部分为弹性变形,由于泡沫材料的弹性应变能很小,波后区域的塑性应变能决定了整个试件的内能大小。从图3b、3c可以看到:随压缩速度增大,试件在相同应变时的波后区域面积减小,但是由于波后区域产生的塑性应变增大,所以泡沫金属中的内能相应增大;由于泡沫金属有一个近似的平台应力,故内能曲线近似为直线;当塑性波到达静止面后,通过反射向下传播,试件经历二次压缩过程,如图5c所示。在二次压缩过程中,试件波后部分应变继续增大,波前部分应变保持不变,试件的内能也继续增加,二次

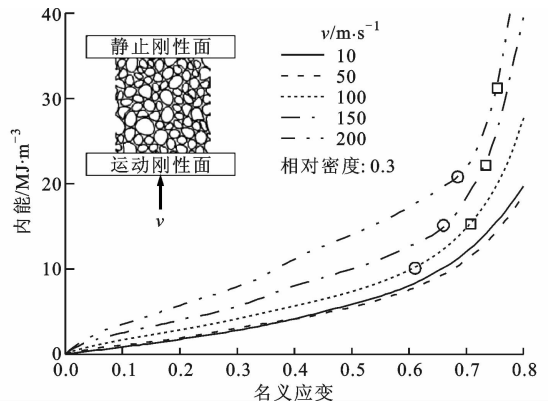


图6 不同加载速度时泡沫金属的内能变化曲线

压缩对应的内能曲线斜率也比第一次压缩过程增大。塑性波遇到运动刚性面会再次发生反射,和二次压缩相比,再次压缩过程(见图5d)中内能曲线的斜率继续增大。

当加载速度较低(压缩速度为10和50 m/s)时,泡沫金属内能变化曲线基本重合。在高速加载时,压缩速度越大,则内能增长越快,内能-应变曲线的斜率就越大,相同压缩应变时拥有的内能也越大。内能曲线的关键节点是第一次和第二次压缩结束时的动态锁死应变,它们均随着压缩速度的增加而增大。

3.3 总能量

动能和内能叠加的结果即为总能量。如图7所示,泡沫金属在冲击压缩过程中吸收的总能量随应变增大而单调增加,可以简化成双折线型。与图6所示内能-应变曲线的区别是,总能量曲线在高速压缩时转折点对应的应变为第二次压缩结束时的动态锁死应变,也就是图4动能-应变曲线达到极小值时的应变。当压缩速度较低(10和50 m/s)时,泡沫金属总能量的变化曲线基本重合;高速加载时,压缩速

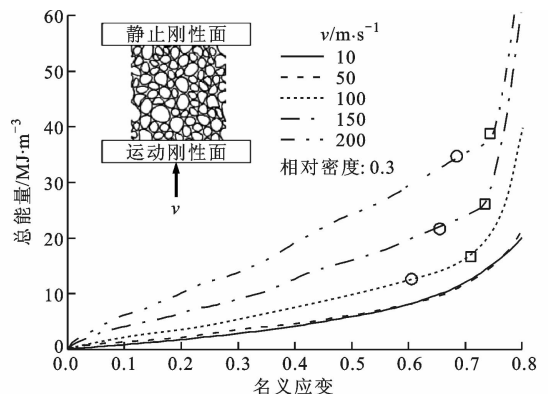


图7 不同加载速度时泡沫金属的总能量变化曲线

度越大,总能量增长就越快,相同压缩应变时吸收的总能量也越大。

3.4 动能和内能的比值

从前面的分析可知,在冲击载荷作用下,泡沫金属的动能和内能对加载速度都非常敏感,此处定义动能和内能的比值来反映泡沫金属在压缩过程中的能量分配。图 8 给出了泡沫金属在不同加载速度下的动能内能比变化曲线,可以看到,在不同的加载速度下,曲线的起始段有一个很陡的短暂峰值,主要是初始弹性波在试件中的传播使得泡沫金属获得瞬间升高的动能,而泡沫金属的初始弹性内能很小。随后塑性波在试件中的传播和反射也在图 8 中有所反映,动能内能比曲线包含的近似平台段、下降段和二次上升段分别对应泡沫金属在冲击载荷下的 3 次压缩过程。由于在各加载速度下第一次压缩过程持续时间最长,因此可以用平台值来反映动能、内能在总能量中的分配。随着压缩速度从 10 m/s 增大到 200 m/s,动能内能比的平台值从接近 0 的位置升高到 0.7~0.8 之间,动能在总能量中的比例逐渐增加,而内能在总能量中的比例减小。低速压缩(10 和 50 m/s)时,泡沫金属动能内能比的平台值小于 0.2,相应地总能量变化曲线基本重合(见图 7),也就是说,当动能内能比在 0.2 以内时,加载速度对总能量吸收的影响可以忽略。

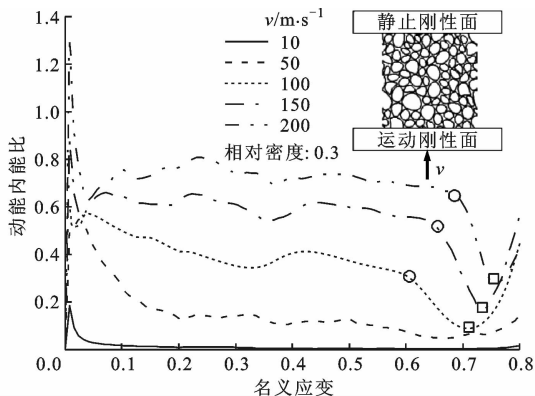


图 8 不同加载速度时泡沫金属的动能内能比变化曲线

本文的研究结果表明:塑性波的传播会影响泡沫金属动能、内能及总能量的变化,动能-应变曲线呈三折线型,而内能和总能量-应变曲线单调增加。能量吸收与压缩速度之间的直接关系(见图 4、图 6 和图 7)是:压缩速度越大,泡沫金属吸收的能量(动能、内能和总能量)增长得越快。

4 结 论

本文通过数值模拟研究了泡沫金属材料在动态压缩过程中的变形特性和弹塑性波的传播,重点讨论了泡沫金属作为防护材料的吸能机理和吸能特性。对于相对密度为 0.3 的泡沫铝,塑性波速表现为随着加载速度的增大而增大,动态锁死应变也随着加载速度的增大而增大。当压缩速度较低时,泡沫金属的动能保持很小的值,内能和总能量变化曲线基本重合。泡沫金属在高速压缩至应变 0.8 的整个过程中,塑性波在泡沫金属试件中发生 2 次反射,试件经历了 3 次压缩过程。相应地,泡沫金属的动能-应变曲线都可以分为 3 个阶段:初始上升段,下降段,二次上升段。内能和总能量变化曲线均单调增加;动能在第一次压缩结束时达到极大值,在第二次压缩结束时达到极小值;随加载速度增大,泡沫金属动能的极大值和极小值也增大,同时,达到极大值和极小值的应变也变大。在高速加载时,压缩速度越大,则动能、内能和总能量均增长越快,能量应变曲线的斜率越大。随着压缩速度从 10 m/s 增大到 200 m/s,动能内能比的平台值从接近 0 的位置升高到 0.7~0.8 之间,动能在总能量中的比例逐渐增加,而内能在总能量中的比例减小。

参考文献:

- [1] LOPATNIKOV S L, GAMA B A, HAQUE M J, et al. Dynamics of metal foam deformation during Taylor cylinder-Hopkinson bar impact experiment [J]. *Composite Structures*, 2003, 61(1): 61-71.
- [2] 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]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, 53(10): 2174-2205.
- [3] 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]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, 53(10): 2206-2230.
- [4] ELNASRI I, PATTOFATTO S, ZHAO H, et al. Shock enhancement of cellular structures under impact loading; part I experiments [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2007, 55(12): 2652-2671.

- [5] MERRETT R P, LANGDON G S, THEOBALD M D. The blast and impact loading of aluminium foam [J]. *Materials and Design*, 2012, 44(1): 311-319.
- [6] PATTOFATTO S, ELNASRI I, ZHAO H, et al. Shock enhancement of cellular structures under impact loading; part II analysis [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2007, 55(12): 2672-2686.
- [7] KARAGIOZOVA D, LANGDON G S, NURICK G N. Propagation of compaction waves in metal foams exhibiting strain hardening [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, 49(19): 2763-2777.
- [8] LIU Y D, YU J L, ZHENG Z J, et al. A numerical study on the rate sensitivity of cellular metals [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 46(22): 3988-3998.
- [9] MA G W, YE Z Q, SHAO Z S. Modeling loading rate effect on crushing stress of metallic cellular materials [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(6): 775-782.
- [10] LIAO Shenfei, ZHENG Zhijun, YU Jilin. Dynamic crushing of 2D cellular structures: local strain field and shock wave velocity [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 57(1): 7-16.
- [11] SONG Yanze, WANG Zhihua, ZHAO Longmao, et al. Dynamic crushing behavior of 3D closed-cell foams based on Voronoi random model [J]. *Materials and Design*, 2010, 31(9): 4281-4289.
- [12] ZHENG Zhijun, YU Jilin, WANG Changfeng, et al. Dynamic crushing of cellular materials; a unified framework of plastic shock wave models [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 53(1): 29-43.
- [13] REID S R, PENG C. Dynamic uniaxial crushing of wood [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(5): 531-570.
- [14] ZHENG Zhijun, LIU Yaodong, YU Jilin, et al. Dynamic crushing of cellular materials; continuum-based wave models for the transitional and shock modes [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 42(1): 66-79.
- [15] LOPATNIKOV S L, GAMA B A, GILLESPIE J W. Modeling the progressive collapse behavior of metal foams [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(3): 587-595.
- [16] LOPATNIKOV S L, GAMA B A, HAQUE M J, et al. High-velocity plate impact of metal foams [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30(4): 421-445.
- [17] 张健, 赵桂平, 卢天健. 闭孔泡沫铝应变率效应的试验和有限元分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(5): 97-101.
- ZHANG Jian, ZHAO Guiping, LU Tianjian. Experimental and numerical study on strain rate effects of close-celled aluminum foams [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(5): 97-101.
- [18] ZHANG Jian, ZHAO Guiping, LU Tianjian. Dynamic responses of sandwich beams with gradient-density aluminum foam cores [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2011, 2(4): 439-451.
- [19] HALLQUIST J O. LS-DYNA keyword user's manual [M]. Livermore, CA, USA: Livermore Software Technology Corporation, 2007: 1430-1431.
- [20] WICKLEIN M, THOMA K. Numerical investigations of the elastic and plastic behaviour of an open-cell aluminium foam [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 397(1): 391-399.
- [21] YOUSSEF S, MAIRE E, GAERTNER R. Finite element modelling of the actual structure of cellular materials determined by X-ray tomography [J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(3): 719-730.
- [22] JEON I, KATOU K, SONODA T, et al. Cell wall mechanical properties of closed-cell Al foam [J]. *Mechanics of Materials*, 2009, 41(1): 60-73.
- [23] JEON I, ASAHINA T, KANG K J, et al. Finite element simulation of the plastic collapse of closed-cell aluminum foams with X-ray computed tomography [J]. *Mechanics of Materials*, 2010, 42(3): 227-236.
- [24] JEON I, ASAHINA T. The effect of structural defects on the compressive behavior of closed-cell Al foam [J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(12): 3415-3423.
- [25] RUAN D, LU G, WANG B, et al. In-plane dynamic crushing of honeycombs; finite element study [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(2): 161-182.
- [26] ZHENG Zhijun, YU Jilin, LI Jianrong. Dynamic crushing of 2D cellular structures; a finite element study [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1): 650-664.

(编辑 葛赵青)