

闭孔泡沫铝应变率效应的试验和有限元分析

张健^{1,2}, 赵桂平^{1,2}, 卢天健^{1,2}

(1. 西安交通大学航天航空学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学强度与振动教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 通过对具有不同孔隙率的闭孔泡沫铝在不同应变率下的动态压缩试验和数值模拟, 研究了泡沫铝的应变率敏感性. 结果表明: 在准静态(0.001 s^{-1})至 $2\,500\text{ s}^{-1}$ 的应变率范围内, 具有相同孔隙率的泡沫铝的静、动态单轴压缩变形模式相似, 而具有不同孔隙率的泡沫铝的压缩变形模式则存在差异, 高孔隙率和低孔隙率泡沫铝的应变率敏感性明显不同; 基体材料的应变率敏感性决定了泡沫铝的应变率敏感性; 微惯性、波效应和孔内气体压力对泡沫铝的平台应力不产生明显影响.

关键词: 闭孔泡沫铝; 霍普金森压杆; 应变率效应

中图分类号: O347 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)05-0097-05

Experimental and Numerical Study on Strain Rate Effects of Close-Celled Aluminum Foams

ZHANG Jian^{1,2}, ZHAO Guiping^{1,2}, LU Tianjian^{1,2}

(1. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. MOE Key Laboratory for Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The strain rate effects of close-celled aluminum foams with different porosities were experimentally and numerically investigated at different strain rates. It is found that the dynamic deformation behavior of aluminum foams with same porosity is similar to their quasi-static behavior in the strain rate ranging from 0.001 s^{-1} to $2\,500\text{ s}^{-1}$. The strain rate effects of aluminum foams with varying porosities are significantly different due to different deformation modes. The strain rate sensitivity of aluminum foams originates mainly from that of their matrix material, while the effects of micro-inertia, shock wave, and compressed air pressure in cells are negligible.

Keywords: close-celled aluminum foam; split Hopkinson pressure bar; strain rate effect

泡沫铝是集多种优良性能(高的比强度、比表面积、阻尼、冲击能量吸收、隔声、隔热和电磁屏蔽等性能)于一身的新型结构功能性材料. 在承受压力时, 其应力-应变曲线上塑性变形阶段的应力几乎恒定不变, 使大量的动能转变为应变能, 因此可用作优良的撞击防护材料. 鉴于泡沫铝在缓冲吸能、防爆隔振等承受动载方面的应用, 研究其应变率效应显得尤为重要. 但是, 由于泡沫铝制备方法的多样性和动态试验技术的差异, 迄今为止国内外学者对泡沫铝应变率效应的研究没有得出一致的结论. Deshpande等^[1]指出, 相对密度为 $0.16\sim0.31$ 的闭孔泡沫铝

(Alulight)的动态试验和静态试验结果非常相似, 应力平台对应变率不敏感, 基体材料的应变率效应对泡沫材料性能的影响程度小于泡沫材料自身的离散性, 孔内气体对泡沫铝强度的影响也可以忽略不计. 但是, Mukai等^[2]随后发现, 相对密度为 $0.106\sim0.155$ 的闭孔泡沫铝 (Alporas) 具有明显的应变率效应, 且由于孔内气体的作用, 随着相对密度的减小, 其应变率敏感性增加. 凤仪等^[3]发现, 采用粉末冶金发泡法制备的泡沫铝(相对密度为 0.16)存在应变率敏感性, 并且指出, 铝合金本身的应变率敏感性、微惯性和气体的作用导致泡沫铝具有较高的应

变率敏感性. 胡时胜等^[4]认为, 泡沫铝是应变率敏感材料, 这种敏感性主要源于胞孔的变形特性、泡沫材料变形的局部化、微观惯性和致密性, 致使泡沫铝材料的压缩屈服应力明显提高, 但基体的应变率效应以及胞孔的形状大小并不对泡沫材料的应变率敏感性起主导作用.

本文通过对具有不同孔隙率的闭孔泡沫铝在不同应变率下的分离式霍普金森动态压缩试验和有限元数值模拟, 试图解释基体材料的应变率效应对泡沫铝动态力学性能的影响.

1 泡沫铝的动态试验分析

试验所用的闭孔泡沫铝采用粉末冶金发泡法制备, 其基体材料除了 Al 外, 还有适量的 Si、Ti 等元素. 图 1 为不同孔隙率的闭孔泡沫铝试件. 为便于比较, 动态试验和静态试验所用试件采用相同尺寸, 均为 $\varnothing 35\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 圆柱体, 在厚度方向保证至少 5 个胞元, 采用电火花线切割加工试件以减少对胞孔结构的损伤.

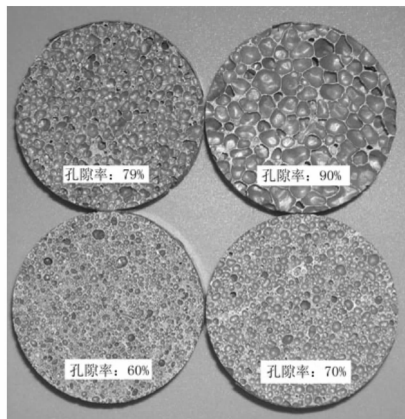


图 1 不同孔隙率的闭孔泡沫铝试件

泡沫铝的准静态单轴压缩试验在 MTS 材料试验机上进行, 高应变率单轴压缩试验采用如图 2 所示的分离式霍普金森压杆 (SHPB) 设备. 基于弹性波在细长杆中传播时无畸变的特性, 当输入杆中的入射脉冲到达试件界面时, 一部分脉冲被反射, 另一

部分脉冲通过试件透射进输出杆, 通过测定入射波、反射波和透射波作用在试件上所产生的应变 $\epsilon_i(t)$ 、 $\epsilon_r(t)$ 和 $\epsilon_t(t)$, 可计算出材料的动态应力-应变曲线. 为简单起见, 本文采用两波法进行数据处理^[5]

$$\sigma(t) = E \left(\frac{A}{A_s} \right) \epsilon_i(t) \quad (1)$$

$$\epsilon(t) = \frac{2c}{l_0} \int_0^t [\epsilon_i(t) - \epsilon_r(t)] dt \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{2c}{l_0} [\dot{\epsilon}_i(t) - \dot{\epsilon}_r(t)] \quad (3)$$

式中: c 为弹性波在杆中的波速; l_0 为试件试验段的原始长度; A 和 A_s 分别为杆和试件的初始横截面积; E 为杆材料的弹性模量.

针对泡沫铝材料, 在 SHPB 试验中采用了以下技术以获得有效的试验数据. 根据阻抗匹配原则, 压杆材料选用硬质铝合金, 其实测密度为 2.78 g/cm^3 , 实测波速为 $5\,215.8\text{ m/s}$, 弹性模量为 75.6 GPa , 屈服强度在 300 MPa 以上. 撞击杆 (子弹)、输入杆、输出杆和吸收杆的直径均为 37 mm , 长度分别为 600 、 $2\,000$ 、 $2\,000$ 和 800 mm , 可以获得较长的加载时间. 为了消除弥散现象和获得相对恒定的应变率, 试验中采用了脉冲整形技术. 经过多次尝试, 选用铅皮作为脉冲整形材料, 因为铅具有质柔软、延性弱、展性强等特性, 尤其是其硬度只有铝硬度的一半, 试验中不会伤害到入射杆和子弹, 整形效果也较好. 整形后一个波大约为 $300\text{ }\mu\text{s}$, 如图 3 所示.

为了避免波形叠加, 在入射杆的中间截面各贴 2 组电阻应变片, 在透射杆中间截面贴 1 组电阻应变片和 1 组半导体应变片, 以便记录相对密度较低时的微弱透射信号. 另外, 将直径 40 mm 的 PVDF 压电传感器置于试件的前、后表面以监控试件的应力均匀性. 由于压电传感器的厚度仅为 $50\text{ }\mu\text{m}$, 可忽略其对应力波传播的影响. 采用高速摄影技术 (Phantom V9.0) 观察泡沫铝的动态压缩变形过程, 拍摄条件为: 速度 $21\,052\text{ fps}$ ($6\,417\text{ m/s}$), 分辨率 $128 \times 240\text{ dpi}$ ($128 \times 240\text{ 点}/(25.4\text{ mm})^2$), 曝光时间 $44\text{ }\mu\text{s}$. 试验时, 试样夹在输入杆和输出杆之间, 在试样的前、后表面涂上凡士林以减小摩擦.

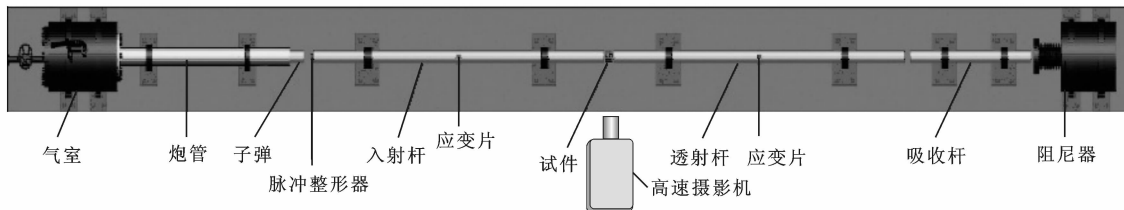


图 2 分离式霍普金森压杆 (SHPB) 设备示意图

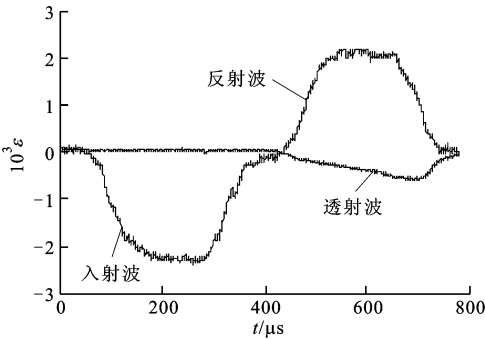


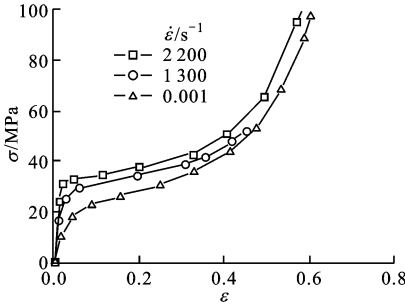
图 3 SHPB 试验的典型波形

图 4 给出了 3 种孔隙率的泡沫铝在不同应变率下的单轴压缩应力-应变曲线. 可以看出,具有不同孔隙率的泡沫铝的应变率敏感性是不同的. 例如,图 4a 中孔隙率为 60% 的泡沫铝在应变率为 $2\,200\text{ s}^{-1}$ 时的平台应力较准静态(0.001 s^{-1})时高出 40%,图 4b 中孔隙率为 70% 的泡沫铝在应变率为 $1\,800\text{ s}^{-1}$ 时的平台应力较准静态时高出 25%,均存在较为明显的应变率效应. 但是,图 4c 中孔隙率为 79% 的泡沫铝在应变率为 $2\,500\text{ s}^{-1}$ 、 900 s^{-1} 和准静态时的平台应力基本重合,没有表现出应变率效应.

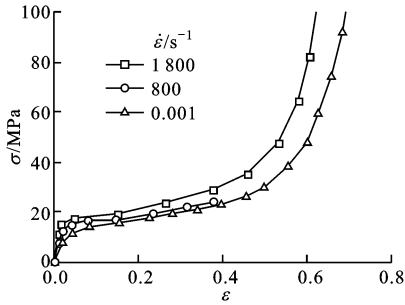
在研究泡沫金属应变率敏感性的文献中,有关泡沫铝应变率效应产生原因的主要解释有:①微惯性;②波效应;③孔内气体压力;④基体材料的应变率效应. 我们通过高速摄影,在应变率从 0.001 s^{-1} 至 $2\,500\text{ s}^{-1}$ 的范围内未发现具有相同孔隙率的泡沫铝在变形模式上的差异,故不考虑微惯性效应. 试件的最大压缩速度为 20 m/s 左右,远小于考虑波效应的临界速度. 此外,采用 PVDF 压电传感器监测试件前、后端面压力的变化,发现除孔隙率为 79% 的泡沫铝在压缩初始的几十微秒有些差异外,其他低孔隙率试件的整个压缩过程均可满足应力均匀性要求. 孔内气体压力的问题较为复杂,但根据文献 [6] 的估算,孔内气体对闭孔泡沫铝压缩平台应力的贡献小于 0.1 MPa ,这样小的影响即使对于孔隙率为 79% 的泡沫铝来说,也可以忽略. 所以我认为,关于泡沫金属应变率的敏感性只能从基体材料的性能方面予以解释.

2 泡沫铝的二维数值模拟

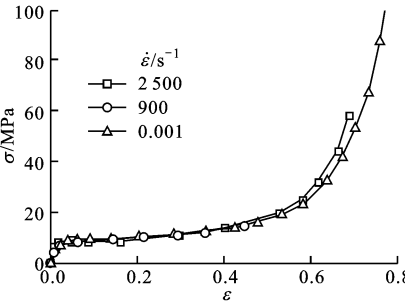
为了进一步探讨泡沫铝基体材料的本构关系及相对密度对泡沫铝变形特性的影响,本文采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对泡沫铝的动态压缩性能进行数值模拟. 根据不同孔隙率泡沫铝的胞孔形状和分布,分别建立了孔隙率为 60%、70% 和 80%



(a) 孔隙率为 60%



(b) 孔隙率为 70%



(c) 孔隙率为 79%

图 4 不同孔隙率泡沫铝的静态名义应力-应变曲线(试验)

的泡沫铝的二维有限元模型,其中孔隙率为 60% 的泡沫铝的模型如图 5 所示. 模型尺寸均为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,选用平面应变单元. 材料的塑性本构关系选用幂硬化模型 [6],表达式为

$$\sigma_y^d = \sigma_y^s \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/P} \right] \tag{4}$$

式中: σ_y^d 、 σ_y^s 分别为材料的动态和静态屈服应力; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; C 、 P 为 Cowper-Symonds 应变率参数,对铝合金取 $C=6\,500\text{ s}^{-1}$, $P=4$ [7],以考虑基体材料的应变率效应,另外,假定参数 $C=6.5 \times 10^6\text{ s}^{-1}$ 以不考虑基体材料的应变率效应. 其他材料参数如弹性模量、泊松比和密度分别取为 75 GPa 、 0.33 和 2.7 g/cm^3 ,未考虑单元失效. 计算时选用单面接触算

法,考虑模型全部表面在整个计算中任一点都可能发生接触.试件夹在两个刚性平面之间,一刚性平面静止,另一刚性平面以恒定速率对试件进行压缩加载,摩擦因数均取为 0.01.

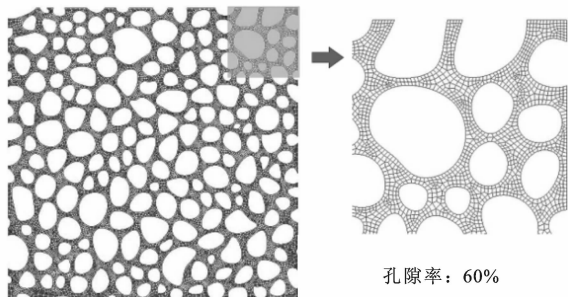
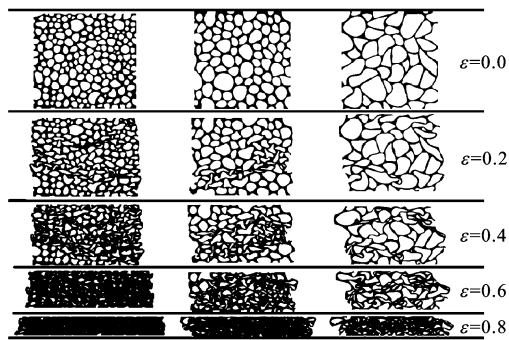


图5 泡沫铝的二维有限元模型

图6为有限元计算得到的不同孔隙率泡沫铝的压缩变形图.图7是分别采用考虑和不考虑基体材料应变率效应的本构模型计算得到的泡沫铝单轴压缩应力-应变曲线.计算结果表明,是否考虑基体材料的应变率效应并不会影响泡沫金属的变形模式,在应变率从准静态增加到 $1\,000\text{ s}^{-1}$ 时,并未发现试件变形模式的差异,与试验结果吻合.

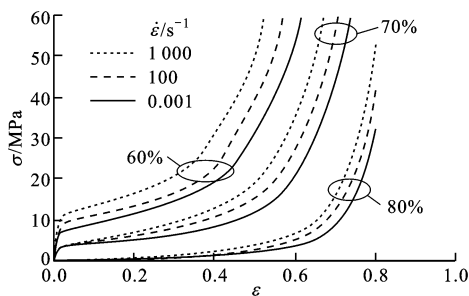


(a)孔隙率 60% (b)孔隙率 70% (c)孔隙率 80%

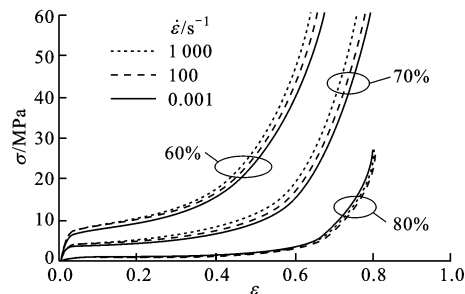
图6 泡沫铝的二维有限元模型变形图

从图7a可以发现,当考虑基体材料的应变率效应时,有限元计算结果和试验结果的趋势基本一致.当孔隙率为 60%和 70%时,试件破坏主要由胞孔的缩小和孔壁材料的塑性流动引起,泡沫金属继承其基体材料的应变率敏感性;当孔隙率为 80%时,试件破坏主要缘于孔壁结构的屈曲和失稳,基体材料的性能得不到有效发挥,这时,泡沫金属的力学性能主要取决于孔的形状和分布,不会表现出明显的应变率效应.因此,基体材料的应变率敏感性是泡沫金属应变率敏感性的源头,如果基体材料有应变率效应,则泡沫金属的应变率敏感性随孔隙率的增大而

降低.另外,从图7b可以看出,如果基体材料没有或只具有很弱的应变率效应,则相应的泡沫金属也不会表现出明显的应变率效应.



(a)考虑基体应变率效应



(b)未考虑基体应变率效应

图7 不同孔隙率泡沫铝在不同应变率下的名义应力-应变曲线(有限元计算)

3 结论

通过对具有不同孔隙率的闭孔泡沫铝在不同应变率下的试验和有限元模拟,发现高孔隙率和低孔隙率泡沫铝具有不同的应变率敏感性.在应变率从准静态至 $2\,500\text{ s}^{-1}$ 的变化范围内,基体材料的应变率敏感性决定了泡沫金属的应变率敏感性,其影响程度随孔隙率的增大而降低,而微惯性、波效应和孔内气体压力对泡沫铝的应变率效应不产生明显影响.对于高孔隙率泡沫铝,在实际应用中不必考虑其应变率敏感性问题.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] MUKAI T, MIYOSHI T. Compressive response of a closed-cell aluminum foam at high strain rate [J]. Scripta Materialia, 2004, 54(4): 533-537.
- [3] 凤仪,朱震刚,潘艺,等. 应变速率对闭孔泡沫铝力学

性能和能量吸收性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2004, 25(2): 268-271.

FENG Yi, ZHU Zhengang, PAN Yi, et al. Influence of strain rate on the mechanical properties and energy absorption capacity of aluminum alloy foam [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2004, 25(2): 268-271.

[4] 胡时胜,王悟,潘艺,等. 泡沫材料的应变率效应 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 13-18.

HU Shisheng, WANG Wu, PAN Yi, et al. Strain rate effect on the properties of foam material [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1): 13-18.

[5] 王礼立. 应力波基础[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社,2005:52-54.

[6] 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.

[7] SU X Y, YU T X, REID S R. Inertia-sensitive impact energy absorbing structures: part II, effect of strain rate [J]. International Journal of Impact Engineering, 1995, 16(4): 673-689.

(编辑 葛赵青)