

应变率和相对密度对泡沫 SiCp/ZL104 压缩性能的影响

罗彦茹¹, 于思荣¹, 朱先勇¹, 张英波²

(1. 吉林大学, 吉林 长春 130025)

(2. 大连交通大学, 辽宁 大连 116028)

摘 要: 对采用熔体发泡法制备的泡沫 5% (体积分数, 下同) SiCp/ZL104 复合材料进行了准静态和动态压缩性能的测试和分析。结果表明: 无论是动态下压缩还是准静态下压缩, 泡沫 5%SiCp/ZL104 复合材料的应力-应变曲线都呈现出典型的 3 个阶段: 线弹性段、平台段和致密段; 屈服应力对应变率很敏感, 使得应变率增加时, 屈服应力增加, 且有应变硬化现象发生; 随着相对密度的增大, 泡沫 5%SiCp/ZL104 复合材料的动态屈服应力和流动应力与准静态载荷相比显著增加。

关键词: 泡沫 SiCp/ZL104 复合材料; 应变率; 相对密度

中图法分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)10-1807-04

泡沫材料作为一种新型的结构与功能兼容的材料, 具有高比强度、吸声、隔热、阻燃、耐蚀、良好的通透性、吸收冲击能量及电磁屏蔽等特性, 主要应用在冶金、建筑、交通运输、电子、机械及通讯等方面^[1,2]。泡沫材料作为一种冲击防护材料, 在其应用场合下要经受高速的变形。冲击载荷作用时间短, 冲击强度高, 单位时间内产生的应变远大于准静态加载条件下的应变, 故在动态载荷作用下表现出的压缩性能明显不同于准静态情况。因此, 研究泡沫材料的应变率对其压缩性能的影响具有十分重要的实际意义。

迄今为止, 对泡沫材料动态压缩行为研究的成果大部分集中在一些泡沫塑料上, 有关泡沫金属动态压缩行为的研究相对较少, 仅有的一些研究主要集中在对泡沫铝的动态压缩性能的研究上^[3,4]。陶瓷颗粒 (SiC、TiB₂、Al₂O₃ 等) 具有改善材料机械性能的潜力, 因而陶瓷颗粒增强泡沫铝基复合材料作为近年来发展的一种新型的泡沫金属材料, 具有比泡沫铝更高的屈服应力, 具有更广阔的开发空间^[5]。本实验主要研究泡沫 SiCp/ZL104 复合材料在动态载荷下的应力-应变行为, 以及相对密度和应变率对其压缩性能的影响。

1 实 验

选用 ZL104 合金、粒度为 28 μm 的 α -绿 SiC 颗粒以及 44 μm 的 CaCO₃ 发泡剂作为实验原材料。实验步

骤如下: (1) 加热 ZL104 合金至全部熔化, 梯度降温至 610~630 $^{\circ}\text{C}$ 后加入预处理过的 SiC 颗粒, 搅拌 8 min, 搅拌速度为 900 r/min; (2) 加入 1% (质量分数) 的 CaCO₃ 搅拌 1 min 后发泡; (3) 发泡温度为 700 $^{\circ}\text{C}$, 发泡保温时间为 2~8 min; (4) 发泡后迅速冷却。

制得相对密度不同的 SiCp/ZL104 泡沫复合材料, 图 1 是相对密度为 0.24 的泡沫 5%SiCp/ZL104 复合材料的截面图。

准静态压缩试验在 CMT5205 电子万能试验机上进行, 压缩速率为 4 mm/min, 试样大小为 15 mm $\times$ 15 mm $\times$ 35 mm。载荷的大小及位移通过传感器输入计算机, 处理后得到不同泡沫复合材料的准静态压缩应力-应变曲线。

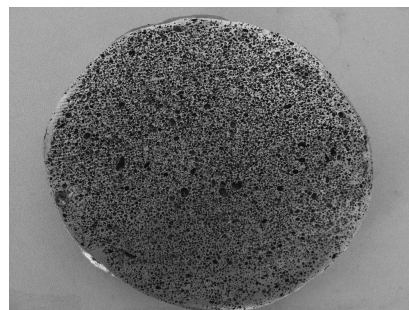


图 1 泡沫 5% SiCp/ZL104 复合材料的截面图

Fig.1 Cross-section of 5% SiCp/ZL104 composite foams

收稿日期: 2008-12-08

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划

作者简介: 罗彦茹, 女, 1979 年生, 博士, 讲师, 吉林大学南岭校区机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025, 电话: 0431-85095357, E-mail: lyr302106@tom.com

采用 SHPB 装置对泡沫成品进行动态压缩性能的测试, 图 2 为装置的示意图。为保证撞击应力波可以无反射地传入入射杆, 子弹 (400 mm)、入射杆 (2000 mm)、透射杆 (2000 mm) 和吸能杆 (1000 mm) 必须具有相同材料和相同的直径 (超硬铝合金, $\phi=37$ mm)。试件被夹在入射杆和透射杆之间, 入射杆和透射杆上均贴有应变片, 由气枪中的压缩空气驱动子弹撞击入射杆的一端, 产生一个弹性波 (入射波) 并在入射杆中传播。当入射波传到试件部位时, 由于杆与试件之间的波阻抗差异, 入射波被部分反射为反射波重新返回入射杆, 而另一部分则透过试件作为透射波进入透射杆, 试件内的应力波在试件内部来回反射, 在经过 2~3 个周期后, 试件内的应力趋于均匀, 而使整个试件被压缩。借助于粘贴在入射杆和透射杆上的应变片, 采用超动态应变仪分别将入射波、反射波以及透射波记录在瞬态波形存储仪上, 运用一维应力波理论可算出试样的应力-应变关系。将相对密度不同的泡沫 SiCp/ZL104 复合材料用线切割设备加工成尺寸为 $\phi 30$ mm $\times$ 10 mm 的圆柱体试样备用。

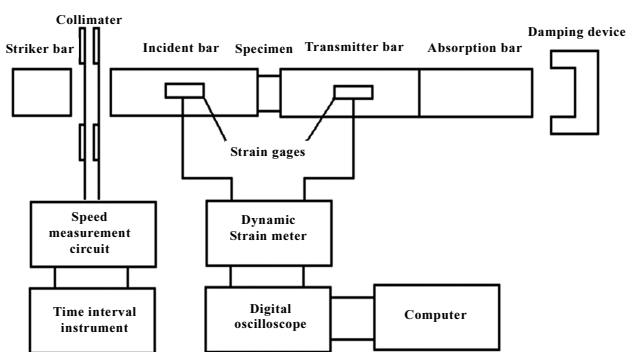


图 2 SHPB 装置示意图

Fig.2 Sketch of SHPB equipment

2 结果与分析

2.1 应变率对泡沫 SiCp/ZL104 复合材料动态压缩性能的影响

图 3 是相对密度为 0.32 的泡沫 5% SiCp/ZL104 复合材料的动态和准静态压缩应力-应变曲线。可见, 无论是动态下压缩还是准静态下压缩, 泡沫 5% SiCp/ZL104 复合材料的应力-应变曲线都呈现出典型的 3 个阶段: 线弹性段、平台段和致密段。动态下的应力-应变曲线明显高于准静态的应力-应变曲线, 动态压缩下的屈服应力为 35 MPa, 而准静态压缩下的屈服应力只有 10 MPa; 两条曲线塑性段的前端都有一个应力波动的过程, 动态压缩曲线的线弹性段对应的应变明显小于准静态压缩曲线的应变; 在平台段动态流动应力随应变上升的速度比准静态的上升得更快, 动态压缩

曲线的平台段的长度远小于准静态压缩过程的平台段长度, 动态压缩曲线的平台段上升趋势则相对陡一些; 相对于准静态压缩曲线, 动态压缩曲线的密实应变要小很多。

图 4 是相对密度为 0.21 和 0.32 时, 泡沫 5% SiCp/ZL104 复合材料的屈服应力随应变率的变化。可以看出, 屈服应力对于应变率和相对密度都很敏感。屈服应力随着应变率的增加而增加, 在应变率小于 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时, 增加的速率较慢; 当应变率大于 600 s^{-1} 时, 增加的速率较快。值得注意的是, 屈服应力随应变率的增加呈现非线性递增的趋势, 对相对密度 ($\rho^*/\rho_s=0.32$) 较大的泡沫复合材料而言, 应变率对于屈服应力的影响更大一些, 泡沫中气体压力是导致屈服应力突然增加的主要原因^[6,7]。

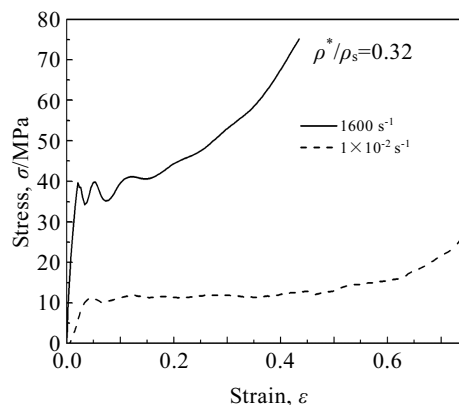


图 3 泡沫 5% SiCp/ZL104 复合材料的动态、准静态压缩应力-应变曲线

Fig.3 Dynamic and quasi-static compressive stress-strain curves of 5% SiCp/ZL104 composite foams

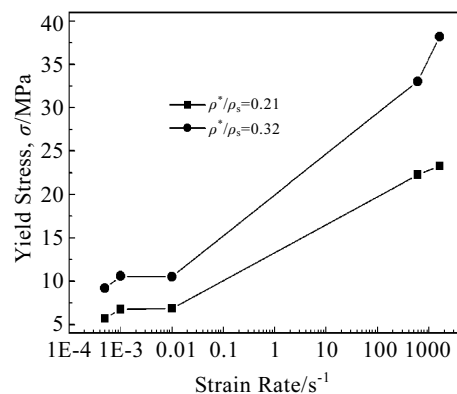


图 4 不同相对密度的泡沫 5% SiCp/ZL104 复合材料的屈服应力随应变率的变化

Fig.4 Yield stress of 5%SiCp/ZL104 composite foams with different relative densities vs. strain rate

对于闭孔泡沫金属而言, 在低应变率下的变形过程空间上不均匀, 变形机制主要为孔壁材料的弯曲和横向拉伸。当材料承受载荷时, 破坏首先出现在最弱的泡孔壁处, 孔壁的材料首先由弹性弯曲转变为塑性弯曲直至断裂, 一旦外力破坏了最弱泡孔, 就会发生其所在的整层泡孔的破坏。随着应力进一步增加, 泡孔的破坏又在孔壁较薄的其它未被破坏的泡孔层中产生。如此反复进行, 最终材料被压实, 整个变形过程较慢。在高应变率下, 应力的增长速度很快, 孔壁弯曲断裂比较明显, 材料被破坏的速度也快。动态压缩时的屈服强度之所以不同于准静态时的屈服强度, 是因为对于同种材料而言, 材料的塑变和破坏都需要时间, 应变率的增加, 意味着做上述运动的时间减少, 因而, 必然需要更大的切应力, 导致材料强度上升。材料强度满足下列关系^[8]:

$$\sigma = \sigma_{ys}^0 \left(1 - \frac{AT}{T_m} \ln \frac{\dot{\varepsilon}_0}{\dot{\varepsilon}} \right) \quad (1)$$

式中, σ_{ys}^0 为基体材料在 0 K 时的屈服强度, A 和 $\dot{\varepsilon}_0$ 是与材料本身有关的常数, T_m 为熔点, $\dot{\varepsilon}$ 是应变率。由式 (1) 可知, 只有应变率发生数量级上的变化时, 同种材料的屈服强度才有明显的不同。

2.2 相对密度对泡沫 SiCp/ZL104 复合材料动态压缩性能的影响

图 5 为不同相对密度的泡沫 5%SiCp/ZL104 复合材料在应变率为 600 和 1600 s^{-1} 时的应力-应变曲线。由图可见, 随着泡沫 5%SiCp/ZL104 复合材料相对密度的增大, 相同应变率所对应的流动应力逐渐增大。相对密度大的泡沫复合材料在相同的应变率下其对应的屈服应力也大, 这一点也与图 4 的结果相一致。图 5a 为泡沫 5%SiCp/ZL104 复合材料在应变率为 600 s^{-1} 时的动态压缩曲线, 600 s^{-1} 的应变率属于动态冲击速率较低的范围, 这种较低的速率致使试样中的应力达不到致密化所需的应力, 因而得出的应力-应变曲线不完整, 应变只达到了 18% 左右; 相比较而言, 图 5b 中应变率为 1600 s^{-1} 的压缩曲线则比较平滑, 比较完整。

与准静态压缩的结果不同的是, 泡沫 5% SiCp/ZL104 复合材料的动态压缩曲线的平台段的斜率变大, 表现出一定的应变硬化, 且相对密度越高, 硬化现象越明显。平台段的长度逐渐减小, 密实化应变随之减小。相对密度是泡沫金属的一个重要的特征参数, 相对密度越大, 孔内气体流动越困难, 引起的应力增量越大。C. San Muchi 和 A. Mortensen^[9]用四面体单胞梁模型模拟了泡沫材料的应力-应变响应, 得出了应力与应变的关系^[9]为:

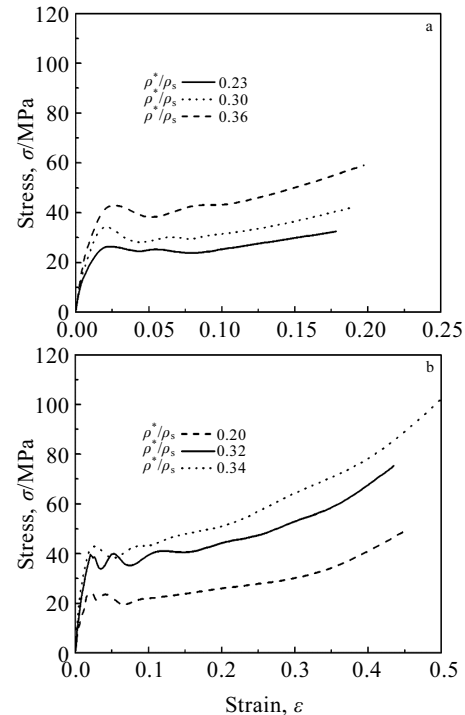


图 5 不同相对密度泡沫 5%SiCp/ZL104 复合材料的动态应力-应变曲线

Fig.5 Dynamic stress-strain curves of 5% SiCp/ZL104 composite foams with different relative densities: (a) $\dot{\varepsilon} = 600 s^{-1}$ and (b) $\dot{\varepsilon} = 1600 s^{-1}$

$$\sigma = C \sigma_{ys} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{\frac{3+n}{2}} \varepsilon^n \quad (2)$$

式中, C 是几何常数, σ_{ys} 是基体材料的强度, n 是基体材料的应变硬化指数。应变率越高, 相对密度越大, 应变硬化就越明显, n 就越大, 泡沫材料的整体强度就会提高。

3 结 论

1) 无论是动态下压缩还是准静态下压缩, 泡沫 5%SiCp/ZL104 复合材料的应力-应变曲线都呈现出典型的 3 个阶段: 线弹性段、平台段和致密段, 且动态下的应力-应变曲线明显高于准静态的应力-应变曲线。

2) 屈服应力对于应变率很敏感, 泡沫 SiCp/ZL104 复合材料的相对密度相同时, 屈服应力随应变率的增加而增加, 并且高应变率下屈服应力的增加速度大于低应变率下屈服应力的增加速度。

3) 泡沫 5%SiCp/ZL104 复合材料的屈服应力随相对密度的增加而增加。

参考文献 References

- [1] Wang D Q, Shi Z Y. *Materials Science and Engineering A*[J], 2003, 361(1~2): 45
- [2] Antonio F, Lorenzo L, Arve G H *et al. Advanced Engineering Materials*[J], 2000, 2(4): 200
- [3] Dannemann K A, James J L. *Material Science and Engineering A*[J], 2000, 293(1~2): 157
- [4] Mukai T, Kanahashi H, Miyoshi T *et al. Scripta Materialia*[J], 1999, 40(8): 921
- [5] Luo Yanru, Yu Sirong, Li Wen *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2008, 460(1~2): 294
- [6] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids, Structure and Properties*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 205
- [7] Mukai T, Miyoshi T, Nakano S *et al. Scripta Materialia*[J], 2006, 54(4): 533
- [8] Ashby M F, Medalist R F. *Metallurgical Transactions A*[J], 1983, 14A(9): 1755
- [9] San M C, Moretensen A. *Acta Mater*[J], 2001, 49(19): 3959

Effects of Strain Rate and Relative Density on Compressive Properties of SiCp/ZL104 Composite Foams

Luo Yanru¹, Yu Sirong¹, Zhu Xianrong¹, Zhang Yingbo²

(1. Jilin University, Changchun 130025, China)

(2. Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: The quasi-static and dynamic compressive properties of 5vol%SiCp/ZL104 composite foams, fabricated by the method of direct melt foaming, were tested and analyzed. The results show that under the conditions of quasi-static or dynamic compression, the stress-strain curves of 5vol%SiCp/ZL104 composite foams involves three regions: the linear elastic deformation region, the collapse plateau region and the densification region. The yield stress is sensitive to the strain rate, so it increases and the strain hardening occurs with the increase of the strain rate. Compared with that under quasi-static loading, dynamic yield stress and flow stress of 5vol%SiCp/ZL104 composite foams increase remarkably with the increase of relative density.

Key words: SiCp/ZL104 composite foams; strain rate; relative density

Biography: Luo Yanru, Ph. D., Lecturer, Institute of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, P. R. China, Tel: 0086-431-85095357, E-mail: lyr302106@tom.com