文章编号: 1001-1455(2014)01-0028-07

空心微珠/Al 复合材料的动态压缩力学性能和吸能特性*

张博一[1],王 伟[1],武高辉[2]

(1. 哈尔滨工业大学土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090;
2. 哈尔滨工业大学金属基复合材料与工程研究所,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 利用分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)系统对空心微珠体积分数为 0.4 的空心微珠/1199Al 复合泡沫在 1 700～2 900 s^{-1} 应变率范围内的动态压缩力学性能、吸能性能进行了研究,还利用 SEM 扫描电镜对压缩试件断口进行微观组织分析,与准静态条件下材料的压缩力学性能及压缩变形机制进行了对比。结果表明,空心微珠/1199Al 复合泡沫是一种应变率敏感材料,与准静态结果相比,在高应变率下复合材料的流动应力和塑性应变有明显的增大,应变率硬化效应对复合材料的流动应力的影响明显大于应变硬化的影响。复合材料的准静态和动态压缩变形机制存在一定差异,动态载荷作用下,空心微珠/1199Al 复合泡沫内部空心微珠的压缩和基体材料的充填同时发生,组分之间具有良好的协调变形能力。

关键词: 固体力学;动态压缩力学性能;分离式霍普金森压杆;空心微珠/1199Al 复合泡沫;吸能特性

中图分类号: O347 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

泡沫金属材料具有良好的压缩力学性能,是吸收冲击能量最理想的材料[1]。与传统泡沫金属相比,采用压力渗透法制备而成的空心微珠/Al 复合泡沫是一种金属铝基体骨架与飞灰/Al 和 Al_2O_3 空心球结合而成的新型复合泡沫金属材料,具有高比强度、高比刚度以及良好的缓冲吸能特性[2]。由于基体内空心微珠的承载作用使该新型复合泡沫金属材料的力学性能,特别是抗冲击吸能性能,比普通泡沫铝大为提高[3],因此被广泛应用于航空航天、军工及工程防护等领域。对空心微珠/Al 复合泡沫材料的压缩力学性能的研究多集中于材料在准静态和中、低应变率加载条件下。A. Daoud 等[4]、P. K. Rohatgi 等[5]制备了不同基体合金的飞灰增强金属基复合材料,表征了材料的密度、热膨胀系数和准静态压缩等性能,并分析了飞灰体积分数不同的飞灰增强金属基复合材料的准静态压缩性能,发现随着飞灰体积分数的提高,材料整体的流动应力也有所增加。D. X. Sun 等[6]、X. F. Tao 等[7]、L. P. Zhang 等[8]采用不同方法制备了 Al_2O_3 和 SiO_2 混合配比空心球复合材料,并分析了复合材料的压缩性能。D. P. Mondal 等[9-11]研究了飞灰/金属基复合材料的结构、压缩性能以及相对密度和应变率对压缩变形行为的影响,发现在相同应变率下随着相对密度的提高,材料的流动应力有明显的增加。Z. Y. Dou 等[3]通过准静态压缩实验对空心微珠平均粒径为 90 和 150 μm 的空心微珠/1199Al 复合泡沫材料进行了测试,发现对于采用同一铝合金基体的复合材料,空心微珠平均直径越小,材料的屈服强度和吸能性越高。空心微珠/Al 复合泡沫材料作为缓冲吸能材料主要承受高速撞击、爆炸等冲击载荷,在冲击载荷下,材料的应变率一般大于 10^3 s^{-1},因此,有必要对高应变率下空心微珠/Al 复合泡沫材料的动态压缩力学性能进行研究。本文中,对空心微珠平均粒径为 80 μm 的空心微珠/1199Al 复合泡沫在准静态和高应变率下的压缩力学性能和吸能性能进行实验研究,分析材料的宏观和微观压缩变形机制。

* **收稿日期**: 2012-08-27; **修回日期**: 2013-02-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108141);中央高校基本科研业务费专项资金项目(HIT. NSRIF. 2011101);黑龙江青年科学基金项目(QC2011C064);哈尔滨科技创新人才基金项目(RC2012QN012011)

作者简介: 张博一(1979—),男,博士,讲师。

1　实验方案

1.1　材料及试件

通过压力渗透技术制备得到空心微珠平均粒径为 80 μm 的空心微珠/1199Al 复合泡沫，材料弹性模量为 16.4 GPa，密度为 1 385 kg/m^3，泊松比为 0.14，采用线切割加工技术分别将复合材料切割成尺寸为∅20 mm×30 mm(准静态实验)和∅8 mm×3 mm(SHPB 实验)的圆柱试件。

1.2　实验设备及原理

准静态实验在 INSTRON 5569 电子万能试验机上进行。动态实验在 SHPB 系统上进行，该装置主要由气枪、子弹、输入杆、输出杆、能量吸收装置和相应的数据采集系统组成，如图 1 所示，实验压杆为直径为 12.7 mm 的 LC4 铝杆，子弹、输入杆和输出杆的长度分别是 500、1 200 和 1 200 mm。通过测定入射、反射和透射脉冲，可计算出材料的动态应力应变曲线。

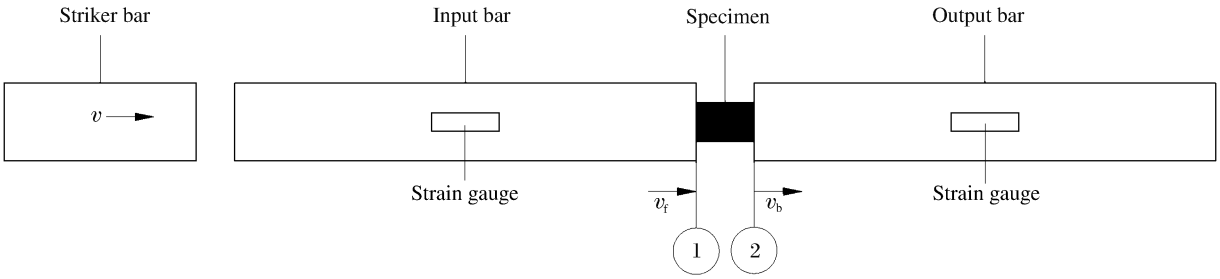


图 1　SHPB 装置简图

Fig. 1　Schematic of SHPB setup

采用半导体应变片以提高信噪比，并在输入杆表面粘贴黄铜片波形整形器，滤去高频信号，延长入射波的加载时间，保证应力波传播过程中应力的均匀性，有利于实现恒应变率，满足实验基本假设[12]。通过改变气室的充气压力以调整撞击杆的速度得到不同的应变率，其范围为 1 700～2 900 s^{-1}。图 2 为动态压缩实验中测得的入射波、反射波和透射波的典型波形。可以看出，透射波波形相对于入射波有较大幅度的减小，其原因可归结为空心微珠/1199Al 复合泡沫与压杆材料相比，阻抗偏低，入射波在经过输入杆与试件的界面时大部分被反射，只有很小部分能透过试件继续向前传播。

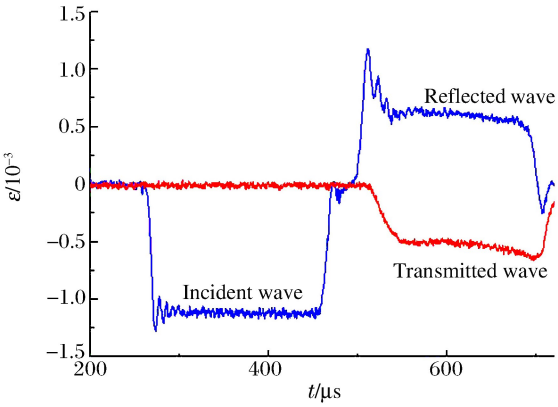


图 2　SHPB 实验中典型的应变波形

Fig. 2　Typical strain waves measured in SHPB experiments

2　实验结果及分析

2.1　压缩应力应变曲线

图 3 为空心微珠/1199Al 复合泡沫在准静态下(应变率为 10^{-3} s^{-1})和在 1 700～2 900 s^{-1}应变率范围内的压缩应力应变曲线。从图 3 可以看出，应变率对复合材料的强度峰值和塑性变形都有明显影响。准静态下，复合材料发生破坏时的塑性应变为 0.44，应变率为 1 700、2 000、2 655 和 2 900 s^{-1}时的塑性应变分别为 0.42、0.54、0.67 和 0.67。这说明，材料在高应变率下比其在准静态下具有更好的塑性变形能力，且复合材料在高应变率下的流动应力比其在准静态下的流动应力显著增大。

准静态下，空心微珠/1199Al 复合泡沫的屈服强度约为 45 MPa，而高应变率下，空心微珠/1199Al 复合泡沫的屈服强度均接近 110 MPa，增加约 1.5 倍。从图 3 还可以看出，对于给定的应变，复合材料的流动应力随应变率的增大而增大；在较高应变率下，复合材料的动态压缩应力应变曲线的变化趋势与

准静态压缩时的相似，即同样存在弹性变形阶段、塑性屈服平台阶段和致密化阶段；在 1 700 s^{-1} 的应变率下，试件的变形量较小，处于平台屈服阶段，材料还未进入致密化阶段；在 2 900 s^{-1} 的应变率下，试件变形较大，材料已经进入致密化阶段。

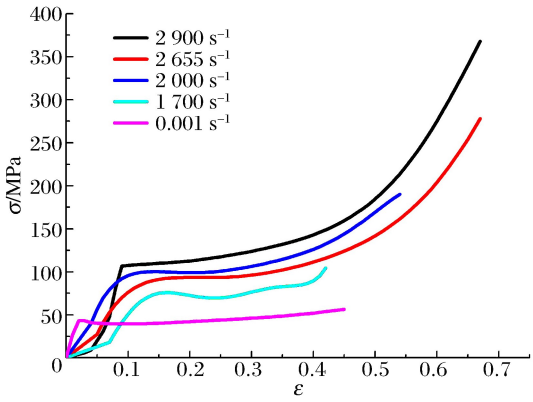


图 3 准静态及动态压缩应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves at quasi-static and dynamic loading conditions

2.2 应变硬化和应变率敏感性

图 4 给出了塑性应变分别为 0.20、0.30 和0.45 时，空心微珠/1199Al 复合泡沫所对应的流动应力 σ 与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的关系曲线。从图 4 中可以看出，对于给定的塑性应变，复合材料的流动应力随应变率的增大而增大，且对应的流动应力随应变率的变化曲线几乎是平行的。在应变率为0.001、1 700、2 000 和 2 900 s^{-1} 时，塑性应变从 0.20 变化到 0.45，空心微珠/1199Al 复合泡沫流动应力增大的幅值明显低于应变率从 0.001 s^{-1} 变化到 2 900 s^{-1} 时其流动应力增大的幅值，说明应变率硬化效应对该复合材料流动应力的影响明显大于应变硬化的影响。

根据文献[12]，应变率敏感率 R 可表示为：

$$R=\frac{\sigma_{\mathrm{d}}-\sigma_{\mathrm{s}}}{\sigma_{\mathrm{s}}}\frac{1}{\ln(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{d}}/\dot{\varepsilon}_{\mathrm{s}})} \tag{1}$$

式中：σ_{d} 和 σ_{s} 分别为在给定塑性应变下的动态流动应力和准静态流动应力；$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{d}}$ 为高应变率，$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{s}}$ 为准静态应变率。

根据式(1)可计算不同塑性应变值对应的 R 值。图 5 为应变率敏感率与塑性应变之间的关系曲线。可以看出，在弹性阶段，复合材料的应变率敏感度上升较快，当复合材料的塑性应变大于 0.15，复合材料的应变率敏感率基本保持恒定，不再随塑性应变的增加而变化。

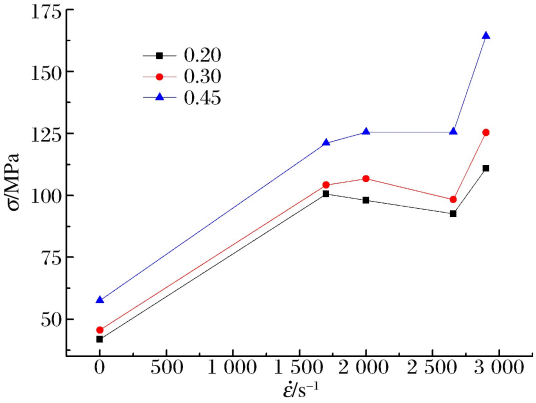


图 4 在不同的塑性应变下，流动应力与应变率的关系曲线

Fig. 4 Flow stress varied with strain rate at different plasitc strains

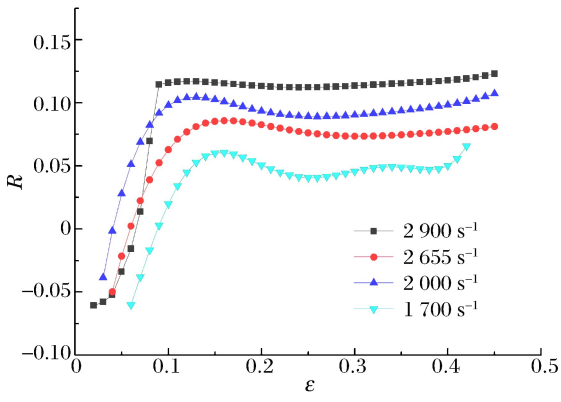


图 5 不同应变率时，塑性应变与应变率敏感率之间的关系

Fig. 5 Strain-rate sensitivity varied with plastic strain at different stain rates

2.3 吸能特性

泡沫金属材料的吸能能力 W 可用单位体积所吸收的能量来表征，J. Miltz 等[13]提出吸能效率 E 和理想吸能效率 I，E 为泡沫铝所吸收的能量与对应应力的比值，I 为真实材料在压缩过程中任意应变下所吸收的能量与理想吸能材料在相同应变下吸收的能量的比值，且有：

$$W=\int_0^{\varepsilon_{\mathrm{m}}}\sigma\mathrm{d}\varepsilon,\qquad E=\frac{1}{\sigma_{\mathrm{m}}}\int_0^{\varepsilon_{\mathrm{m}}}\sigma\mathrm{d}\varepsilon,\qquad I=\frac{1}{\sigma_{\mathrm{m}}\varepsilon_{\mathrm{m}}}\int_0^{\varepsilon_{\mathrm{m}}}\sigma\mathrm{d}\varepsilon \tag{2}$$

式中：ε_m 为任意应变，σ_m 为对应的应力。

在 W 和 E 的计算公式中，应变可以在 0～ε_{max} 的范围内任意取值，ε_{max} 为压缩应力应变曲线上的最大应变。考虑到泡沫金属材料在压实应变 ε_d（屈服平台的截止应变）以下可以发挥最佳的吸能特性，空心微珠/1199Al 复合泡沫的相对密度为 0.41，即压实应变 ε_d，这里选用 $\varepsilon_m=\varepsilon_d=0.41$。根据不同应变率下材料的压缩应力应变曲线，通过数据处理得到如图 6～7 所示的材料吸能效率 σ-E 曲线和理想吸能效率 σ-I 曲线，综合考察其吸能特性。

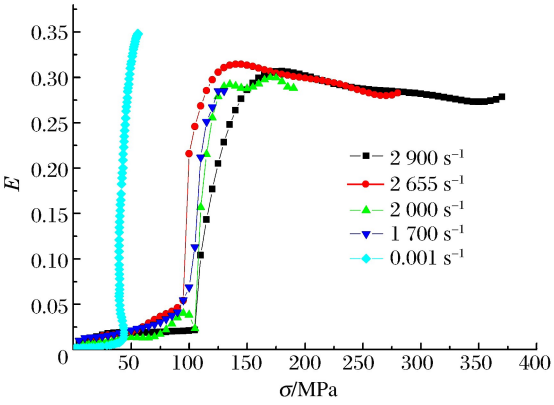


图 6　不同应变率时吸能效率与压缩应力的关系曲线

Fig. 6　Energy-absorption efficiency as a function of compressive stress at different stain rates

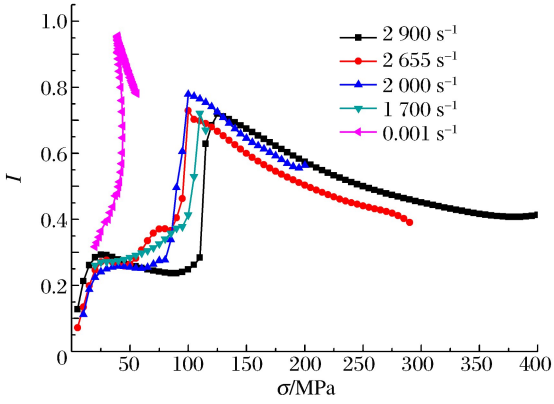


图 7　不同应变率时理想吸能效率与压缩应力的关系曲线

Fig. 7　Ideal energy-absorption efficiency as a function of compressive stress at different stain rates

从图 6 可以看出，在准静态下，当压缩应力为 55 MPa 时，空心微珠/1199Al 复合泡沫的吸能效率达到最大值 0.35；在 1 700～2 900 s^{-1} 的应变率范围内，当压缩应力为 130～175 MPa 时，吸能效率的最大值均接近 0.31。吸能效率最大值所对应的压实点应力和理想吸能效率最大值所对应的平台应力都随应变率的增大而增大，表明空心微珠/1199Al 复合泡沫是一种应变率敏感材料。

从图 7 中可以看出，理想吸能效率随压缩应力的增大而快速达到峰值，当压缩应力达到一定程度后，理想吸能效率迅速回落，在 3 种应变率下理想吸能效率的最大值为 0.75～0.80，说明空心微珠/1199Al 复合泡沫是一种优良的吸能材料。此外，空心微珠/1199Al 复合泡沫理想吸能效率的最大值随应变率的变化不明显，可见理想吸能效率曲线反映的是材料的固有属性。

2.4　宏观变形与微观组织分析

图 8 为复合泡沫试件准静态压缩变形过程中不同阶段的宏观变形及微细观 SEM 照片，该复合泡沫材料的准静态压缩变形大致分为 3 个阶段。

(1)线弹性阶段：圆柱体处于弹性变形范围内，外力卸载后，变形可恢复原状，此时空心球并未发生压碎(图 8(a))，试件外形保持不变(图 8(d))。

(2)塑性屈服平台阶段：此时圆柱体中心和端部所受的应力较大，这些部位的空心球首先发生破碎，在这些区域造成了应力集中，导致周围的空心球也逐渐发生压碎破坏，在较致密的高应力区域，由于 1199Al 基体的流动性受到空心球的限制，开始在这些部位形成微裂纹(图 8(b))；这一阶段试件压缩变形量达到 9%(图 8(e))。

(3)致密化阶段：随着压缩变形量的进一步增加，沿裂纹开展方向破碎的空心球继续增多，且原来已经破碎的空心球变得更致密，其包含的孔洞完全消失(图 8(c))，裂纹进一步向试件内部扩展，有些裂纹发生了连接；此时横向拉应力也急剧增加，圆柱体试件横向压缩变得更明显，裂纹扩展致使试件发生劈裂，最终试件压缩变形量达到 35%(图 8(f))。

由图 8(f)可知，压缩后试样仍大致保持圆柱状，在试件的根部边缘至顶部边缘沿 45°方向出现显著的剪切斜裂纹，裂纹从角部萌生，逐步向试件内部扩展及部分裂纹相连。

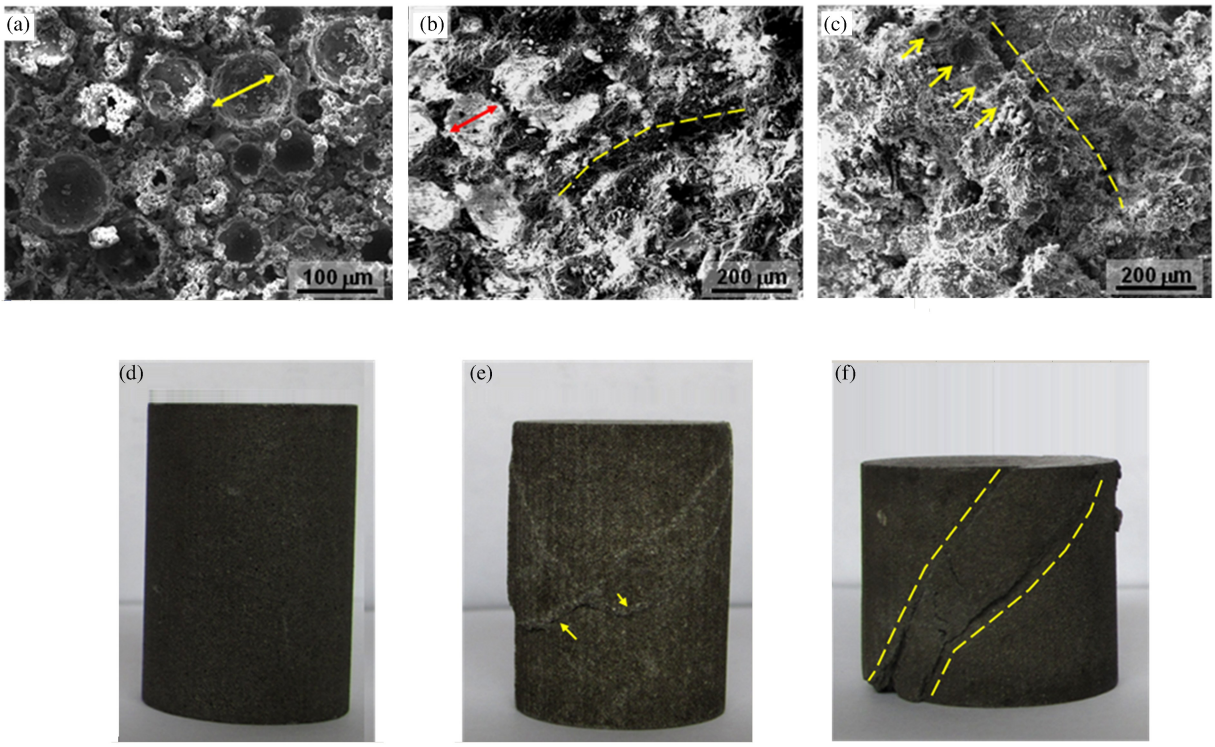


图 8 复合泡沫试件准静态压缩变形过程中宏观变形及微观组织

Fig. 8 Macroscopic deformation and microstructure of composite foam specimen undergoing quasi-static compression

图 9 为空心微珠/1199Al 复合泡沫在实验前及在不同冲击速度下压缩后的宏观形貌。压缩后,试件直径变大,高度缩短,呈圆饼状,且变形程度随加载应变率的增大而增大,但试件整体仍保持完好,未出现类似准静态压缩时的剪切斜裂纹。这表明,空心微珠/1199Al 复合泡沫中的 1199Al 基体在动态压缩下具有良好的协调变形能力,保证了空心微珠在近似恒应力下被压实,充分发挥其“吸能体”的作用。

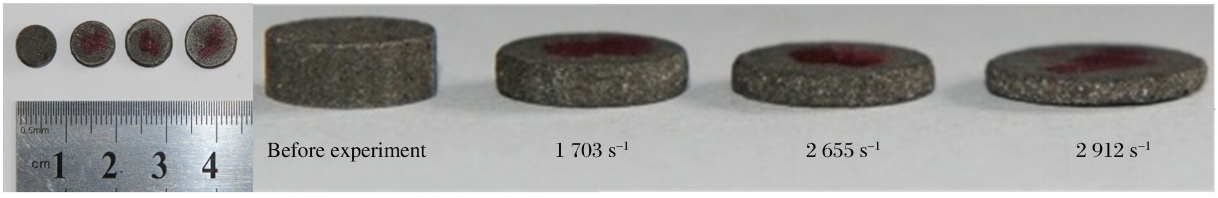


图 9 试件的压缩变形

Fig. 9 Compressive deformation of specimen

SHPB 动态压缩实验前后空心微珠/1199Al 复合泡沫试件纵向剖面的 SEM 观察如图 10 所示,力的方向为水平方向,空心微珠增强体的压缩变形情况也如图 10 所示。

由图 10 可以看出:实验前,材料内部均匀地填充着空心微珠增强体;压缩变形后,复合材料内部的吸能体——空心微珠均被压碎,由于基体组织在分切应力的作用下发生流动,进而使复合材料的组织变得致密。动态压缩变形机理为:变形初期主要由 1199Al 基体和空心微珠承受动态荷载,此阶段对应于复合材料应力应变曲线的线弹性阶段;随着冲击应变率的增大,1199Al 基体产生明显的塑性变形,空心微珠增强体的体积逐渐减小,其所属区域也逐渐被 1199Al 基体占据,空心微珠的被压缩和基体材料的被充填同时发生;在变形的后期,空心微珠完全被压实,材料被压缩到致密状态变成颗粒增强类材料,材料的流动应力随应变的增大而快速增大。此外,SEM 照片显示,材料动态压缩后的剖面上不存在明显的剪切裂纹。这说明,复合材料在动态载荷下具有良好的协调变形能力和抗冲击变形能力。

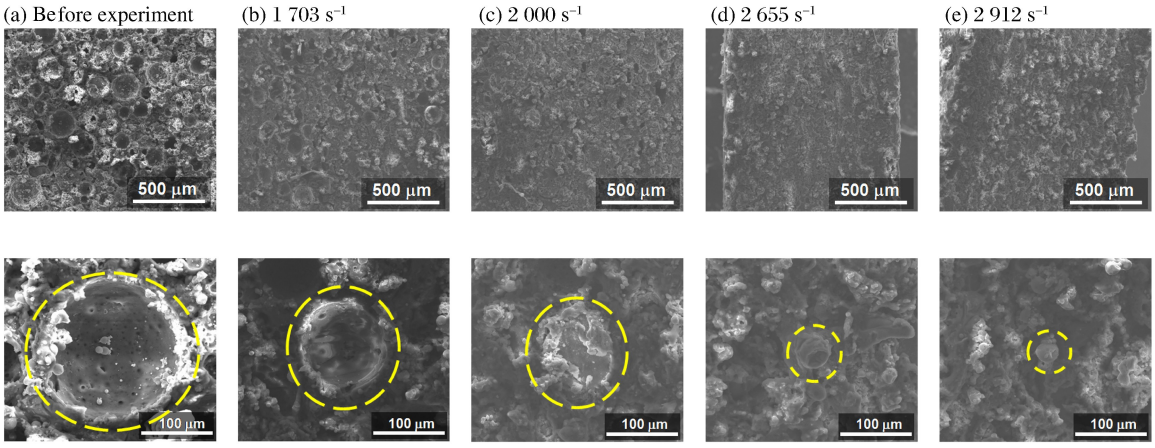


图 10　不同应变率下试件断口和空心微珠压缩变形的 SEM 图片

Fig. 10　SEM pictures for the fractured surfaces of specimens and the compressive deformation of cenospheres at different strain rates

3　结　论

准静态和动态压缩实验表明：空心微珠/1199Al 复合泡沫是一种应变率敏感材料；在高应变率下，该复合泡沫比其在准静态下具有更好的塑性变形能力，且高应变率下该复合泡沫的流动应力比其在准静态下的流动应力显著增大，应变率硬化效应对复合材料流动应力的影响明显大于应变硬化效应对其流动应力的影响；该复合泡沫在动态压缩下的应力应变曲线的变化趋势与其在准静态压缩下的应力应变曲线的变化趋势相似。

空心微珠/1199Al 复合泡沫材料具有优异的吸能能力，吸能效率最大值所对应的压实点应力和理想吸能效率最大值所对应的平台应力都随应变率的增大而增大。复合材料准静态压缩变形机制与动态压缩变形机制有所区别：准静态压缩过程中，在屈服平台阶段，压缩应力较集中的区域空心微珠发生连续破碎，附近产生裂纹，并最终形成剪切斜裂纹；而动态压缩过程中，空心微珠的被压缩和基体材料的被充填同时发生，1199Al 基体具有良好的协调变形能力。

参考文献：

[1]　Degischer H P, Kriszt B. Handbook of cellular metals: Production, processing, applications[M]. Wiley-Vch, 2002.

[2]　Ahmaruzzaman M. A review on the utilization of fly ash[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2010,36(3):327-363.

[3]　Dou Z Y, Jiang L T, Wu G H, et al. High strain rate compression of cenosphere-pure aluminum syntactic foams [J]. Scripta Materialia, 2007,57(10):945-948.

[4]　Daoud A. Effect of fly ash addition on the structure and compressive properties of 4032-fly ash particle composite foams[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009,487(1/2):618-625.

[5]　Rohatgi P K, Daoud A, Schultz B F, et al. Microstructure and mechanical behavior of die casting AZ91D-fly ash cenosphere composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009,40(6/7):883-896.

[6]　Sun D X, Zhao Y Y. Static and dynamic energy absorption of Al foams produced by the sintering and dissolution process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2003,34(1):69-74.

[7]　Tao X F, Zhao Y Y. Compressive behavior of Al matrix syntactic foams toughened with Al particles[J]. Scripta Materialia, 2009,61(5):461-464.

[8]　Zhang L P, Zhao Y Y. Mechanical response of Al matrix syntactic foams produced by pressure infiltration casting [J]. Journal of Composite Materials, 2007,41(17):2105-2117.

[9] Mondal D P, Das S, Ramakrishnan N, et al. Cenosphere filled aluminum syntactic foam made through stir-casting technique[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009,40(3):279-288.

[10] Mondal D P, Goel M D, Das S. Compressive deformation and energy absorption characteristics of closed cell aluminum-fly ash particle composite foam[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009,507(1/2):102-109.

[11] Mondal D P, Goel M D, Das S. Effect of strain rate and relative density on compressive deformation behaviour of closed cell aluminum-fly ash composite foam[J]. Materials and Design, 2009,30(4):1268-1274.

[12] San Marchi C, Cao F, Kouzeli M, et al. Quasistatic and dynamic compression of aluminum-oxide particle reinforced pure aluminum[J]. Materials Science and Engineering: A, 2002,337(1/2):202-211.

[13] Miltz J, Gruenbaum G. Evaluation of cushioning properties of plastic foams from compressive measurements[J]. Polymer Engineering and Science, 1981,21(15):1010-1014.

Dynamic-compression mechanical properties and energy-absorption capability of fly-ash cenospheres-reinforced 1199Al-matrix composite foam*

Zhang Bo-yi[1], Wang Wei[1], Wu Gao-hui[2]

(1. *School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150090, *Heilongjiang, China*;
2. *Center for Metal Matrix Composites Engineering Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001, *Heilongjiang, China*)

Abstract: The fly-ash cenospheres-reinforced 1199Al-matrix composite foam was prepared by the pressure infiltration technique, in which containing the 80-μm-sized fly-ash cenospheres with the volume fraction of 0.4. Dynamic compression experiments were performed with a split Hopkinson pressure bar (SHPB) setup to investigate the dynamic compression properties and energy-absorption capability of the prepared composite foam in the strain rate range from 1 700 s^{-1} to 2 900 s^{-1}. And the fractured surfaces of the compressed specimens were observed by a scanning electron microscopy. Moreover, the energy-absorption capability and the deformation mechanism of the prepared composite faom in dynamic compressions were compared with those of it in quasi-static compressions by an Instron 5569 tensile machine. The results show that the cenospheres-reinforced 1199Al-matrix composite foam is a strain-rate sensitive material. Its flow stress and plastic strain at the high strain rates are obviously higher than those under the quasi-static conditions. And the strain-rate hardening effect can more markedly influence the flow stress of the cenospheres-reinforced 1199Al-matrix composite foam than the strain-hardening effect. Furthermore, there are some differences between the quasi-static and dynamic compressive deformation mechanisms in the cenospheres-reinforced 1199Al-matrix composite foam. Under dynamic loadings, the fly-ash cenospheres in the cenospheres-reinforced 1199Al-matrix composite foam can be simultaneously compressed when the Al-matrix material is being filled, and there lies a good coordinate deformation capacity between the components.

Key words: solid mechanics; dynamic-compression mechanical properties; split Hopkinson pressure bar; fly-ash cenospheres-reinforced 1199Al-matrix composite foam; energy-absorption capability

---

* Received 27 August 2012; Revised 4 February 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (51108141)
Corresponding author: Zhang Bo-yi, boyi79@163.com

(责任编辑 张凌云)