复合材料学报 第22卷 第4期 8月 2005年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 22 No. 4 August 2005

文章编号: 1000-3851 (2005) 04-0017-06

环氧树脂复合泡沫材料的压缩力学性能

卢子兴[1,*], 石上路[1], 邹 波[1], 寇长河[1], 张子龙[2], 李鸿运[2]
(1. 北京航空航天大学 固体力学研究所, 北京 100083; 2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要: 对空心玻璃微珠填充环氧树脂复合泡沫材料进行了准静态压缩实验, 研究了材料的宏观压缩力学性能, 并提出了弹性模量和屈服强度的预测公式。此外, 对压缩试件的断口进行了宏、细观观察, 研究了材料的压缩破坏机理。结果表明, 复合泡沫材料在压缩过程中, 具有普通泡沫材料的应力-应变曲线的典型特征, 在应变为2%左右时材料发生屈服, 在应变大于30%后发生破坏。此外, 材料的杨氏模量和强度均随密度的减小而下降, 预测公式给出的结果与实验值基本一致。压缩试件断口的宏、细观观察表明, 复合泡沫材料主要的破坏形式为剪切引起的弹塑性破坏。

关键词: 复合泡沫材料; 力学性能; 压缩; 失效机理; 环氧树脂
中图分类号: TB332; O344 **文献标识码**: A

COMPRESSIVE BEHAVIOR OF EPOXY SYNTACTIC FOAM

LU Zixing[1,*], SHI Shanglu[1], ZOU Bo[1], KOU Changhe[1], ZHANG Zilong[2], LI Hongyun[2]
(1. Institute of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The compressive mechanical properties of epoxy syntactic foam reinforced with hollow glass microspheres are studied by quasi-static compression tests. Some predicting formulae of Young's modulus and yield strength of syntactic foam are proposed based on the results of composite mechanics. In addition, the failure mechanism of syntactic foam is investigated by macroscopic and microscopic observation of fractured specimens. The results show that the deformation characteristics of syntactic foams are very similar to those of plain foams during compression. The syntactic foam is yielded when the strain reaches about 2% and it is collapsed when the strain is larger than 30%. Furthermore, the Young's modulus and yield strength of syntactic foam are decreased with the decrease of density of material, and the predicted results of formulae are basically in agreement with the experimental data. The macroscopic and microscopic observation of fractured specimens indicates that the main failure mode is elasto-plastic collapse caused by shear.

Keywords: syntactic foam; mechanical properties; compression; failure mechanism; epoxy resin

为了提高泡沫材料的力学性能, 通常在泡沫材料制备过程中向基体中填加各种增强相, 从而获得增强泡沫材料或复合泡沫材料(填充空心微珠)。复合泡沫材料分为三相复合泡沫(在发泡过程中填入空心微珠)和两相复合泡沫材料。两相复合泡沫材料是指将空心微珠直接填入基体中不通过发泡而得到较低密度的一种泡沫材料。与普通泡沫材料相比, 复合泡沫材料具有许多独特的优点, 如密度易于精确控制, 机械性能较高等。对复合泡沫材料力学性能的研究已引起国内外研究者的广泛关注[1], 例如, Huang和Gibson[2]提出了空心微珠填充复合材料弹性模量的数学方法。而在国内, 卢子兴等[3,4]提出了对含有有限体积比的、一般空心微珠增强的复合材料有效模量的一些预测方法, 并最先开展了聚氨酯复合泡沫塑料力学性能的实验研究。最近, Bardella和Genna[5]比较了复合泡沫材料的实验与理论预测和有限元计算的结果。而Gupta等[6]利用实验手段, 研究了填充微珠壁厚对复合材料力学性能的影响, 还考虑了试件长宽比对实验结果的影响。从文献[1]可知, 复合泡沫材料的理论

收稿日期: 2004-09-15; **收修改稿日期**: 2005-03-01
基金项目: 国防科技重点实验室基金 (51460020103hk01); NSAF联合基金 (10276004)
通讯作者: 卢子兴, 教授, 主要研究方向为复合材料力学和轻质、防护材料力学 E-mail: luzixing@263.net

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

分析与实验结果间存在着较为明显的差异。因此，通过实验来了解材料的力学性能仍是一种必要的手段，其结果对改进复合泡沫的力学模型也有着十分重要的意义。本文中将对空心玻璃微珠填充环氧树脂复合泡沫材料的压缩力学性能进行实验研究。

1　实验描述

空心玻璃微珠为秦皇岛玻璃微珠厂产品，粒度为 10～250 μm，堆积密度为 0.14～0.16 g/cm^3，抗碎强度 2～4 MPa。环氧树脂牌号为 830 高模量树脂。固化剂为三乙醇胺与三乙烯四胺体系的室温快速固化剂。实验选取 6 种空心玻璃微珠与环氧树脂的配比方案。由于工艺稳定性问题，对其中两种配比做了两组材料；为探讨固化剂用量的影响，对其中一种配比选用两种固化剂用量，因而共计 10 种材料。试件材料参数如表 1 所示。从表 1 可以发现，材料密度的稳定性并不太好，这是由于在混合过程中引入了空气，导致材料中存在了孔隙。根据材料密度和环氧树脂密度，可得到空心玻璃微珠的表观密度为 0.289 g/cm^3。进一步还可得到各种材料中环氧树脂、空心玻璃微珠体积含量和孔隙度，结果见表 1。

按照 ASTM C365 —00 标准，并参照文献[5]，压缩试件的高度选为 12.5 mm，横截面为 25 mm × 25 mm 的正方形。每种材料的试件数量为 5 个。根据实验标准要求，实验环境要求温度为(23 ±3) ℃，湿度(50 ±5) %。加载速率为 0.5 mm/min。全部实验在 MTS 万能材料实验机上完成。加载前后对材料进行细观观察，了解材料微观形貌和空心玻璃微珠在基体中的分布，并观察试件在破坏后的断口形貌。

2　实验结果和分析

2.1　压缩应力-应变特性

图 1 分别为 1 号、3 号和 8 号材料的应力-应变曲线。从图 1 可见，除了初始段应力-应变曲线存在一点非线性外，应力-应变关系表现出一个明显的线弹性段；在应变达到 2 %左右时，玻璃微珠开始脱粘和碎裂，使得应力-应变曲线的斜率急剧下降几乎至零，应力随应变基本不发生变化或者仅随应变的增加缓慢增加，此阶段曲线一般称为材料在变形过程中的平台区[7]；当应变超过 15 %时，复合泡沫开始被压密实，使得应力-应变曲线的斜率随应变的增加而又开始快速增加，直至破坏，这段曲线一般称为材料在变形过程中的致密区。破坏时的材料应变一般超过 30 %。图 2 为 8 号材料 5 个试件的应力-应变曲线。由图 2 可见，5 个试件的应力-应变曲线基本上是重合的，这表明材料的均匀性较好。其它编号材料的应力-应变曲线与 8 号材料的情况也基本相同。说明材料的整体性能并没有因为材料的采样区域不同而发生明显变化。

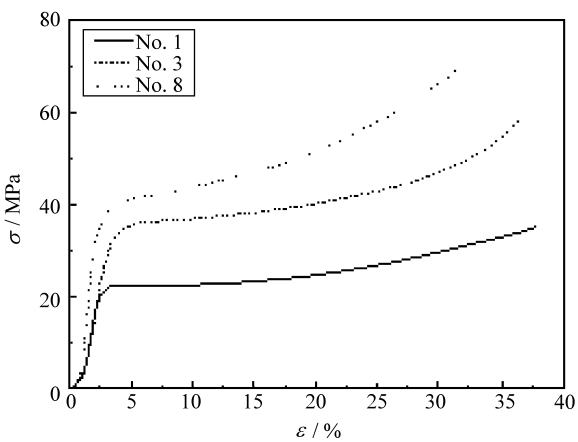


图 1　3 种材料的应力-应变曲线

Fig. 1　Compressive stress-strain curves of three materials

表 1　实验材料参数

Table 1　The parameters of materials

No.	Mass ratio (Microspheres/resin)	Mass fraction of hardener/ %	Density / (g·cm^{-3})	Volume fraction of epoxy resin	Volume fraction of microspheres	Void
1	1/4	12	0.688	0.448	0.476	0.076
2	1/5	12	0.732	0.496	0.422	0.082
3	1/6	12	0.778	0.543	0.385	0.073
4	1/7	12	0.874	0.622	0.378	0.000
5	1/7	12	0.733	0.522	0.317	0.161
6	1/8	10	0.86	0.622	0.331	0.047
7	1/8	12	0.703	0.508	0.270	0.221
8	1/8	12	0.859	0.621	0.330	0.048
9	1/9	12	0.804	0.589	0.278	0.133
10	0	12	1.229	1.000	0.000	0.000

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

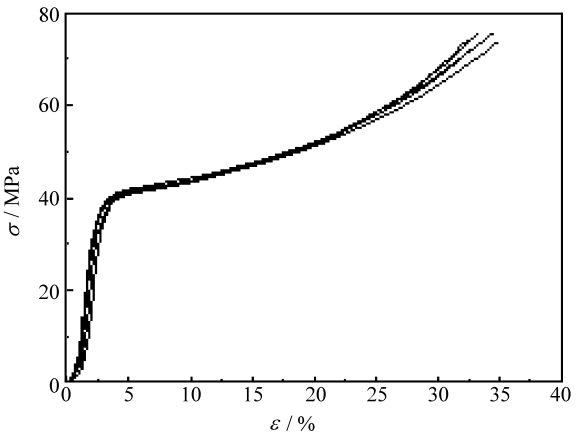


图 2　8 号材料的应力-应变曲线

Fig. 2　Stress-strain curves of material No. 8

2.2　压缩模量分析

图 3 为实验所得各种材料的相对模量值(与环氧树脂模量的比值)与预测值的比较，其中每种密度材料相对模量的实验值为 5 个试件的平均值。可以看到同一密度材料的相对模量不稳定，主要原因在于材料内部结构形式存在差异，如孔隙的不规则分布等。此外，可以观察到，除 7 号材料相对模量较为异常外，其它材料的相对模量分布较为规律，相对模量随密度的增加呈增加的趋势。将预测普通泡沫材料杨氏模量的 Gibson 和 Ashby 公式[8]推广，可得到用于预测复合泡沫材料杨氏模量的平方律加和形式的公式，即

$$E^* = E_1 R_1^2 + E_2 R_2^2 \tag{1}$$

其中：E^*、E_1 和 E_2 分别为复合泡沫、基体材料和空心球球壁材料的杨氏模量，R_1、R_2 为这两种材料的体积含量。从实验结果与预测结果对比可见，预测值与实验值较为吻合，只有 7 号材料的实验值远高于预测值。因此，对普通泡沫材料广泛使用的平方律模型，在复合泡沫材料的杨氏模量预测中也有较好的结果。但是，复合泡沫材料中的主要变形机制远比普通泡沫材料中的复杂，对这方面展开研究有助于进一步提高模型对复合泡沫材料杨氏模量的预测效果。

2.3　压缩强度分析

根据空心玻璃微珠填充环氧树脂的压缩应力-应变曲线，延伸曲线线性段和平台区应力-应变曲线的直线段，将两直线交汇点定义为材料的单轴压缩屈服应力点。对于纯环氧树脂，由于没有平台区，当材料达到最大应力后应力随应变增加而下降，故取最大应力点的应力作为纯环氧树脂的单轴压缩屈服应力。相对屈服应力(即与纯环氧树脂的单轴压缩屈服应力的比值)的实验值与预测结果的比较如图 4 所示。其中强度预测的公式利用了 Nicolais 和 Narkis[9]论文中和 Ahmed 和 Jones[10]综述文章中的结果，并分别考虑了空心玻璃微珠和孔隙的影响，即有

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu}\left(1 - 1.21\left(\frac{V_s}{V_s + V_e}\right)^{2/3}\right)(1 - 1.21V_g^{2/3}) \tag{2}$$

$$\sigma_{cu} = 0.5\sigma_{mu}\left(1 - \left(\frac{V_s}{V_s + V_e}\right)^{2/3}\right)(1 - V_g^{2/3}) \tag{3}$$

其中：σ_{cu} 和 σ_{mu} 分别为空心玻璃微珠填充复合泡沫材料的极限强度应力和基体的极限强度应力，V_s 为空心玻璃微珠体积含量，V_e 为环氧树脂体积含量，V_g 为材料的孔隙度。从图 4 可以看到，实验值位于两种预测方法的结果之间，并有十分相似的变化趋势。值得注意的是，在压缩实验结果中，模量与其它材料有所差异的 7 号材料的屈服强度并没

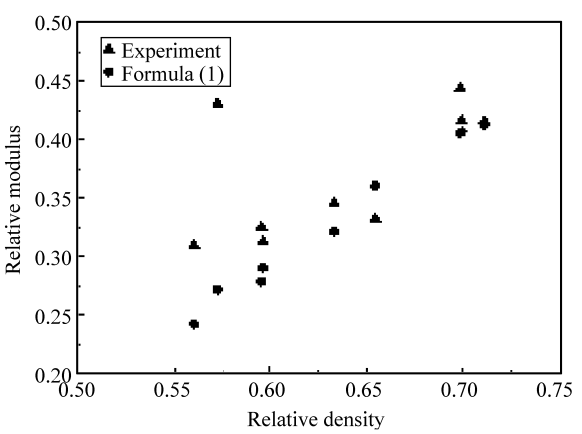


图 3　实验值与简单平方律加和模型预测对比

Fig. 3　Comparison of experimental and theoretical values

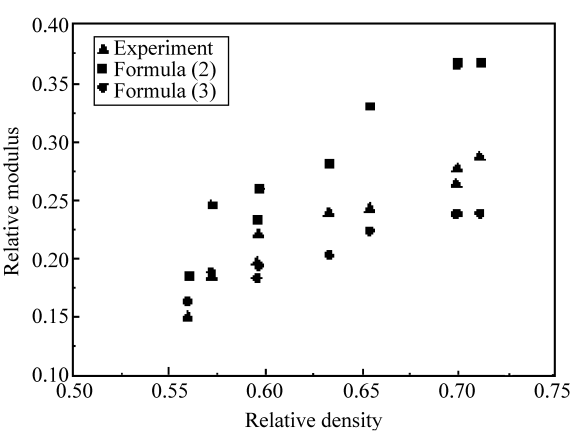
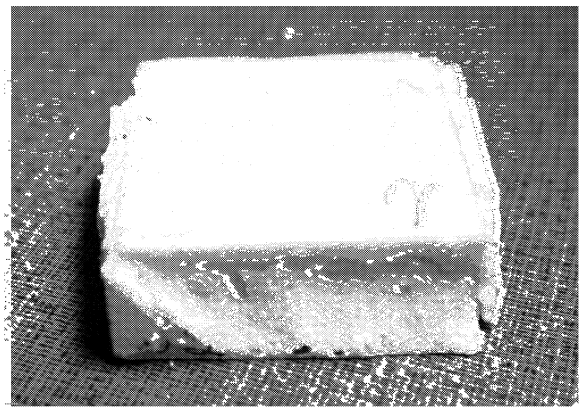


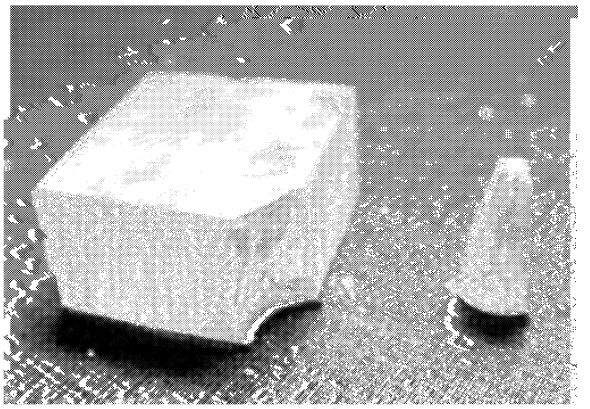
图 4　屈服应力实验值与预测值

Fig. 4　Experimental and predicted values of yield stress

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)No. 2



(b)No. 10

图 5　压缩破坏后宏观破坏形貌

Fig. 5　Fractured specimen after compression

有明显异于其它材料。从图中可以观察到屈服强度的结果更接近于式(3)的预测值，而与式(2)的预测值有 20 %以上的误差。本文作者在进行屈服应力预测时，将孔隙与空心玻璃微珠分别进行计算。但是，在实际的复合泡沫材料中，孔隙不仅以单独的气泡形式出现，也常出现在紧密排布的空心玻璃微珠之间，从而构成了孔隙与空心玻璃微珠共同组成的填充形式。这种填充方式将有可能大大削弱复合泡沫材料的屈服应力。

2.4　宏、细观观察和分析

压缩实验试件破坏形貌如图 5 所示。纯环氧树脂试件的破坏形式与其余试件的破坏形式不同。纯环氧树脂试件在达到屈服应力后，随应力下降，发生边角处的崩落，破坏端面与载荷方向的角度较小。并且，在试件内部有少许与载荷方向成较小角度的裂纹产生。而空心玻璃微珠填充环氧树脂试件破坏时，试件略呈鼓状，裂纹面从加载端面四边，沿着与载荷方向约 45 角向试件内部扩展，直至与另一条裂纹面相汇，图 6 给出了破坏的宏观示意图(右侧为压缩时断面变形形状，左侧为破坏断面脱落形式)。

对材料进行显微观察，有助于了解复合泡沫材料的结构形貌和空心微珠的分布形式，也有助于判断材料的破坏形式以及空心微珠与基体的粘结状况。本实验不仅对破坏前的材料进行了扫描电镜观察，也对破坏后的材料断面进行了扫描电镜观察。观察前使用水砂纸对材料表面进行打磨，清洗后镀膜，然后置于扫描电镜中观察。材料实验前，扫描电镜观察图样(1、3、8 号材料)如图7所示。可以

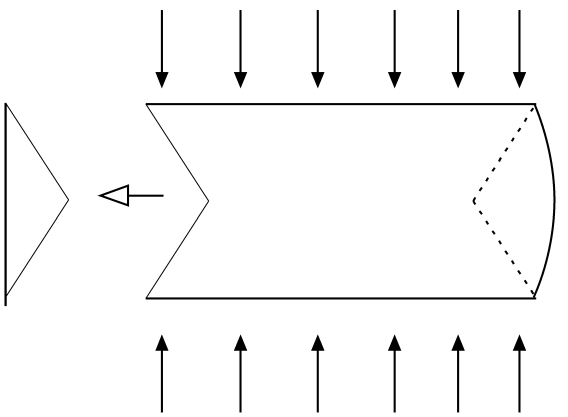
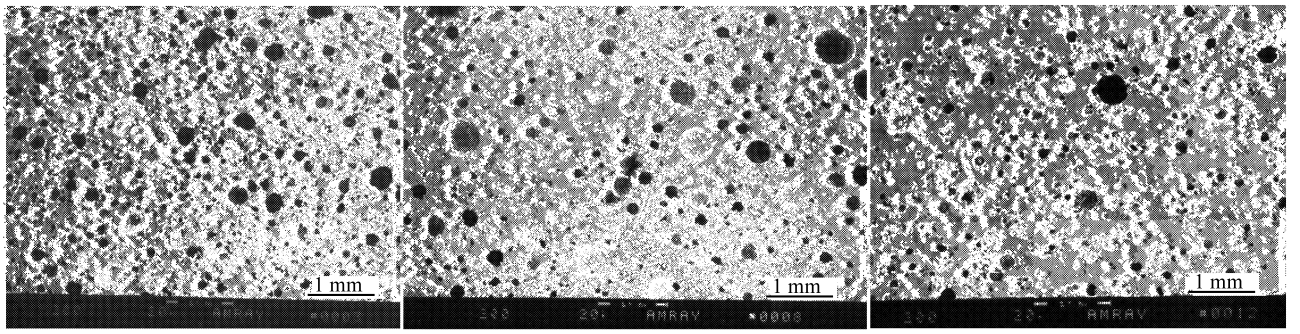


图 6　试件破坏示意图

Fig. 6　Schematic illustration of damaged specimen

观察到，随着填充比的变化，微珠分布密度差异明显，而这在光学显微观察中较难得到。另外，对观察表面进行打磨，造成了表面部分空心微珠脱落，形成了空洞。其中 1 号材料中，空洞分布较为密集，这可能是由于空心玻璃微珠的填充量增加，发生团聚的微珠较多，使得空心玻璃微珠更容易剥落。结合光学显微观察可知，空心玻璃微珠的粒径分布范围较广，颗粒粒径分布在 100 μm 左右。大量小于 50 μm 的空心微珠团聚在基体中，团聚体半径为 100～200 μm，仅有少量小粒径微珠均匀单个分布在基体中。而粒径大于 100 μm 的空心微珠很少发生团聚现象，总体上较为均匀地分布在基体中。另外，粒径大于 200 μm 的空心微珠数量很少，并且较大粒径的微珠表面通常存在圆形孔洞缺陷。1 号和 8 号材料试件的破坏断面扫描电镜图样如图 8所示。可见，填充比较大的1号材料，试件破坏

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)No.1 (b)No. 3 (c)No. 8

图 7 材料实验前扫描电镜图样

Fig. 7 SEM photographs of material before test

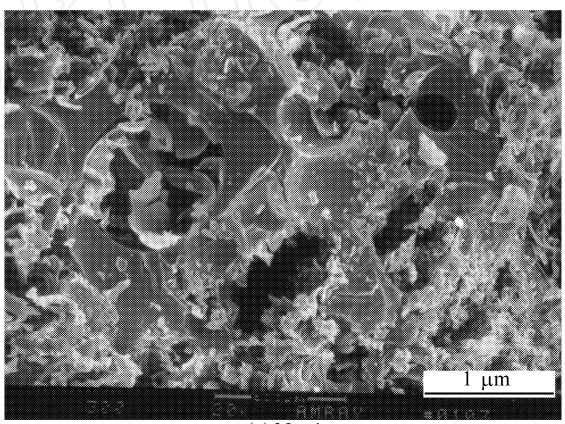
断面十分粗糙、不规则，大量分布着破坏后空心玻璃微珠和环氧树脂脱落的颗粒。从放大的图中可以更清晰地看到空心玻璃微珠完全碎裂，并从基体脱落形成空洞；同时，发现在部分基体上有少许条状云纹产生，这是剪切带内基体塑性变形的典型特征。填充比较小的 8 号材料，试件破坏断面上能较多地观察到环氧树脂基体在破坏断面上的形貌。从中也可以看到空心玻璃微珠的碎裂和脱落。尤其在放大的图中，空心玻璃微珠不仅碎裂，而且清晰地观察到碎片从基体材料上脱落形成的缝隙。这表明空心玻璃微珠在受到载荷后，变形并开始从基体脱落，空心玻璃微珠与环氧树脂基体的界面性能并不理想。另外，观察基体材料的破坏形貌，发现基体破坏面上存在大量条状云纹，这表明破坏断面的形成也主要是受到剪切带内裂纹塑性扩展的影响。

3 结 论

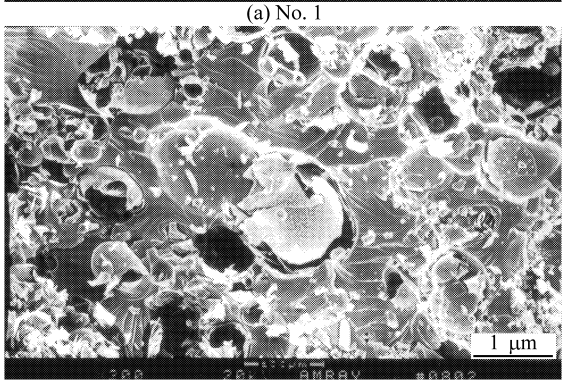
(1) 空心玻璃微珠填充环氧树脂复合泡沫在压缩过程中，具有普通泡沫材料应力-应变曲线的典型特征，即经历了线弹性区、平台区和致密区三个阶段。在应变为 2 %左右时材料发生屈服，在应变大于 30 %后发生破坏。此外，材料的杨氏模量和强度均随密度的减小而下降。

(2) 提出了空心微珠填充复合泡沫材料的模量和强度预测公式，预测结果与实验值基本一致。从模量和强度的分析可知，空心玻璃微珠的影响主要表现在材料应力-应变曲线的线弹性区，当材料达到屈服后，空心玻璃微珠多数已被破坏，使得材料的力学性能与普通泡沫材料的性能十分类似。

(3) 显微观察表明，材料中空心玻璃微珠的粒径分布范围较广，并且在材料中，较小粒径的微珠



(a) No. 1



(b) No.8

图 8 试件破坏面的扫描电镜照片

Fig. 8 Fractured surfaces of specimen in SEM

极易发生团聚，较大粒径的微珠表面通常存在圆形孔洞缺陷。材料破坏后，断面处空心玻璃微珠完全破碎并大量脱落，因而观察到的断面十分粗糙，同时具有细小的不规则裂纹在断面中分布。另外，断面处基体材料表面有大量条状云纹产生，可以断定材料的主要破坏形式为剪切引起的弹塑性破坏。

参考文献：

[1] 卢子兴. 复合泡沫塑料力学行为的研究综述 [J]. 力学进

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

展, 2004, 34(3): 341 - 348.
Lu Z X. A review of studies on the mechanical behavior of syntactic foamed plastics [J]. *Advances in Mechanics*, 2004, 34(3): 341 - 348.

[2] Huang J S, Gibson L J. Elastic moduli of a composite of hollow spheres in a matrix [J]. *J Mech Phys Solids*, 1993, 41(1): 55 - 75.

[3] 卢子兴, 严寒冰. 复合泡沫塑料有效模量的预测方法 [A]. 见: 徐秉业, 黄筑平主编, 塑性力学和地球动力学进展 [C]. 北京: 万国学术出版社, 2000. 111 - 117.
Lu Z X, Yan H B. Prediction methods of effective Young's modulus for syntactic foams [A]. In: Xu B Y, Huang Z P, eds. Advances of Plasticity and Geodynamics [C]. Beijing: Inter Academic Publishers, 2000. 111 - 117.

[4] 卢子兴, 严寒冰, 刘 波, 等. 复合泡沫塑料力学性能的实验研究 [A]. 见: 白以龙, 杨 卫主编. 力学2000 [C]. 北京: 气象出版社, 2000. 584 - 586.
Lu Z X, Yan H B, Liu B, *et al*. Experimental investigation on mechanical properties of syntactic foams [A]. In: Bai Y L, Yang W, eds. Mechanics in 2000 [C]. Beijing: Meteorological Publishers, 2000. 584 - 586.

[5] Bardella L, Genna F. On the elastic behavior of syntactic foams [J]. *Inter J Solids and Struct*, 2001, 38(40 - 41): 7235 - 7260.

[6] Gupta N, Woldesenbet E, Mensh P. Compression properties of syntactic foams: Effect of cenosphere radius ratio and specimen aspect ratio [J]. *Composites Part A*, 2004, 35(1): 103 - 111.

[7] 卢子兴, 袁应龙. 高应变率加载下复合泡沫塑料的吸能特性及失效机理研究 [J]. 复合材料学报, 2002, 19(5): 114 - 117.
Lu Z X, Yuan Y L. Investigation into the energy absorption and failure characteristics of syntactic foams at high strain rates [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2002, 19(5): 114 - 117.

[8] Gibson L J, Ashby M F. The mechanics of three-dimensional cellular materials [J]. *Proc Roy Soc Lond*, 1982, A382: 43 - 59.

[9] Nicolais L, Narkis M. Stress-strain behavior of styrene-acrylonitrile/glass bead composites in the glassy region [J]. *Polym Eng Sci*, 1971, 11: 197 - 199.

[10] Ahmed S, Jones F R. A review of particulate reinforcement theories for polymer composites [J]. *J Mater Sci*, 1990, 25: 4933 - 4942.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net