复合材料学报 第19卷 第5期 10月 2002年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 19 No. 5 October 2002

文章编号: 1000-3851(2002)05-0114-04

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

卢子兴[1,2], 袁应龙[1]
(1. 北京航空航天大学 固体力学研究所, 北京 100083; 2. 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

摘 要: 通过SHPB冲击实验装置对空心玻璃微球填充聚氨酯复合泡沫塑料进行了动态压缩实验,获得了不同密度复合泡沫塑料在高应变率加载条件下的应力-应变曲线,研究了材料的动态力学性能。基于所获得的应力-应变曲线,进一步分析和讨论了复合泡沫塑料的能量吸收特性,发现材料最佳吸能点的包络线是同一直线。此外,通过动态变形试件的扫描电镜分析,还研究了这类新材料的动态失效问题。

关键词: 复合泡沫塑料; 力学性能; 应变率效应; 吸能特性; 失效
中图分类号: TB332; O344 **文献标识码:** A

INVESTIGATION INTO THE ENERGY ABSORPTION AND FAILURE CHARACTERISTICS OF SYNTACTIC FOAMS AT HIGH STRAIN RATES

LU Zi-xing[1,2], YUAN Ying-long[1]
(1. Institute of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
(2. Laboratory for Nonlinear Mechanics of Continuous Media, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract: Some dynamic compressive tests about polyurethane rigid (PUR) syntactic foams have been done by SHPB experimental set. The stress-strain curves of PUR syntactic foams of 3 different densities are obtained at higher strain rates and their dynamic mechanical properties are also investigated at the same time. Based on all the stress-strain curves obtained, the characteristics of the energy absorption of PUR syntactic foams are analyzed and discussed furthermore. It is found that the envelope of optimum energy absorption of PUR syntactic foams is the same line in the energy absorption diagram. In addition, the dynamic failure characteristics are studied by means of SEM analyses for PUR syntactic foams specimens after loading.

Key words: syntactic foams; mechanical properties; strain rate effect; energy absorption; failure

复合泡沫塑料是重要的工程防护材料,它是将空心微球填充到树脂基体或泡沫塑料中而制得的一种新型复合材料。与普通泡沫塑料相比较,复合泡沫塑料具有许多独特的优点,如密度易于控制,机械性能较高,是一种轻质高强的材料。因此,它在航空、航天和航海等领域有广泛的应用前景[1]。由于这类材料经常用于包装、冲击防护和爆破防护等方面,所以它们的动态力学行为受到工程界的普遍关注。虽然前人对复合泡沫塑料的静、动态力学性能已有一些研究[1,2],但多数工作仅限于两相复合泡沫塑料(空心球填充复合材料),对三相复合泡沫塑料(空心球填充泡沫塑料)的研究甚少,尤其是对动态力学性能的研究未见文献报道。最近,我们针对三相聚氨酯复合泡沫材料进行了比较广泛的实验研究,并在文献[3]中做了简要介绍。本文作者将针对不同密度聚氨酯复合泡沫塑料(含空心玻璃微球)的动态压缩实验的结果,讨论它们在不同应变率加载下的应力-应变特性,并在实验所得到的应力-应变曲线基础上,进一步分析复合泡沫塑料的能量吸收特性。此外,还对实验后的变形试件进行了扫描电镜分析,研究了这

收稿日期: 2001-10-18; 收修改稿日期: 2002-03-05
基金项目: 国家自然科学基金(10072007), NSAF联合基金和教育部留学回国人员科研启动基金(教外司留[2001]345)资助项目
作者介绍: 卢子兴(1960), 男, 博士, 教授, 从事泡沫材料和复合材料力学行为的研究。

类新材料的动态失效机理。

1 实验描述

实验所用材料经注模成型工艺制成, 共制得 3 种不同密度的硬质聚氨酯复合泡沫塑料, 并且每一种密度的材料又包括不同空心玻璃微球填充比的情况。其中空心玻璃微球的相关参数为: 平均外径 75 μm, 抗碎强度 3MPa～5MPa, 微球表观密度接近 0.5g/cm^3。为便于描述, 文中作者将密度范围为 0.1g/cm^3 左右的材料称为低密度材料, 将密度为 0.3g/cm^3 左右的材料称为中密度材料, 将密度为 0.5g/cm^3 左右的材料称为高密度材料。针对上述材料, 本文作者利用 SHPB 冲击实验装置进行了动态压缩实验, 并且对实验后的试件进行了扫描电镜分析。其中, SHPB 动态压缩实验在中国科大冲击动力学实验室研制的大尺寸 Hopkinson 压杆上进行。试件为直径 25mm, 厚度 12mm 的圆柱体。实验分为三组 (每组 2 个～4 个试件), 各组的应变率分别为 600/s, 1500/s 和 2200/s 左右。而冲击后试件的扫描电镜分析在北航材料系 JSM-5800 型扫描电镜上进行, 待观察样品取自试件的横截面或纵向截面内, 并经超声波清洗和镀膜(金) 处理而制得。

2 实验结果和分析

2.1 动态压缩性能

图 1 为玻璃微球含量为 10%, 不同密度的复合泡沫塑料试件在不同应变率加载条件下的应力-应变曲线, 其中图 1(a), 图 1(b), 图 1(c) 分别对应低密度、中密度与高密度材料的情况。由图可见, 高应变率加载下, 复合泡沫塑料的应力-应变曲线也分为弹性区、(屈服) 平台区和致密区三个部分。对比不同密度的动态应力-应变曲线, 不难看出, 密度对应力-应变特性的影响最大, 而应变率的增加只对高密度材料的应力-应变曲线产生比较明显的影响。

2.2 能量吸收特性

按照文献[4] 的介绍, 评价泡沫材料的吸能特性主要采用吸能率曲线和能量吸收图。吸能率曲线的方法最初由 Miltz[5] 等提出, 他们用 E(Efficiency) 参数来表示泡沫塑料的吸能率, 用 I(Ideality) 参数来表示其理想的吸能率。其中, E 参数定义为真实泡沫塑料试件压缩到最大应变 ε_m 所吸收的能量同具有相同尺寸的理想泡沫塑料试件完全压缩并传递相同

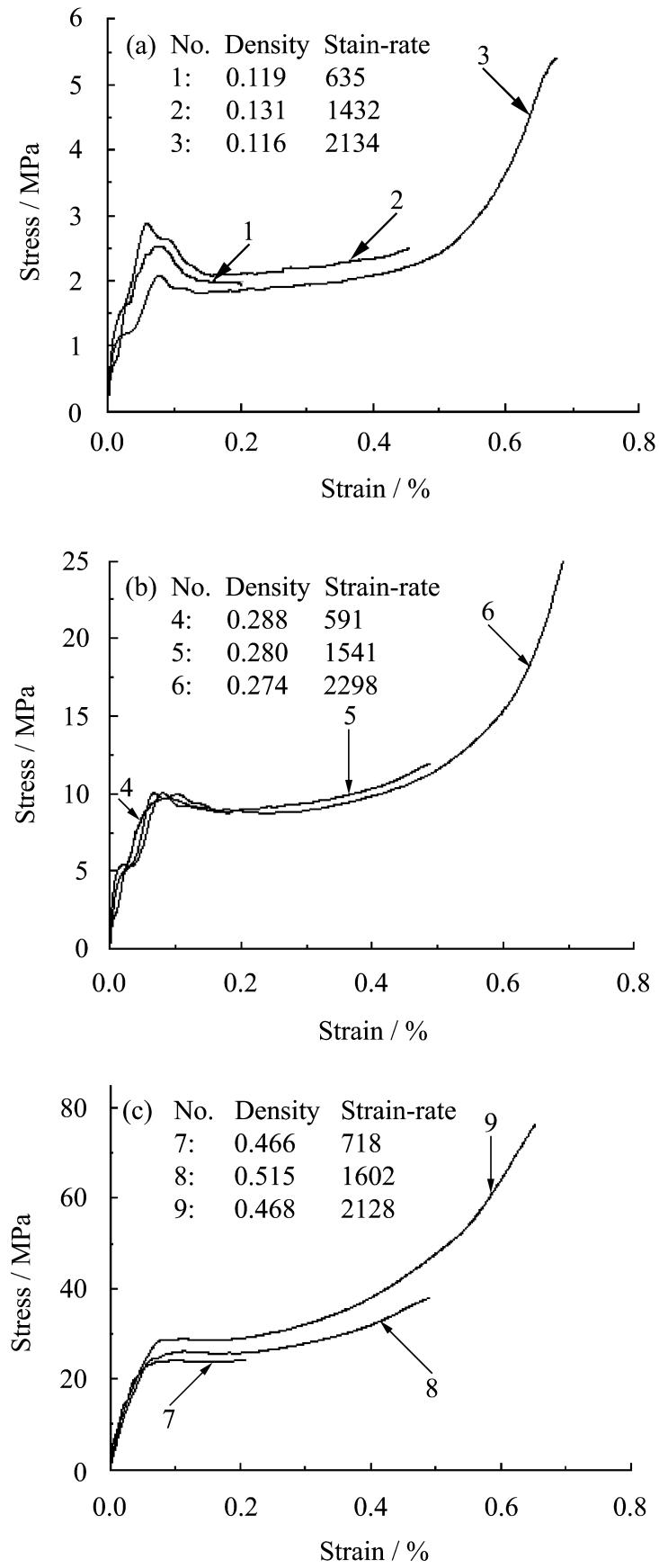

图 1 不同密度和应变率下复合泡沫塑料的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of PUR syntactic foams of different densities at different strain rates

的最大应力 σ_m 时所吸收能量的比值, 即

$$E = \int_0^{\varepsilon_m} \sigma \cdot d\varepsilon / (\sigma_m \times 1) \tag{1}$$

而 I 参数定义为真实泡沫塑料和理想泡沫塑料试件压缩到相同应变所吸收能量的比值, 即

$$I = \int_0^{\varepsilon_m} \sigma \cdot d\varepsilon / (\sigma_m \cdot \varepsilon_m) = E / \varepsilon_m \tag{2}$$

能量吸收图的方法是由 Gibson[6] 等提出的, 单位体积泡沫塑料吸收的能量 W 定义为

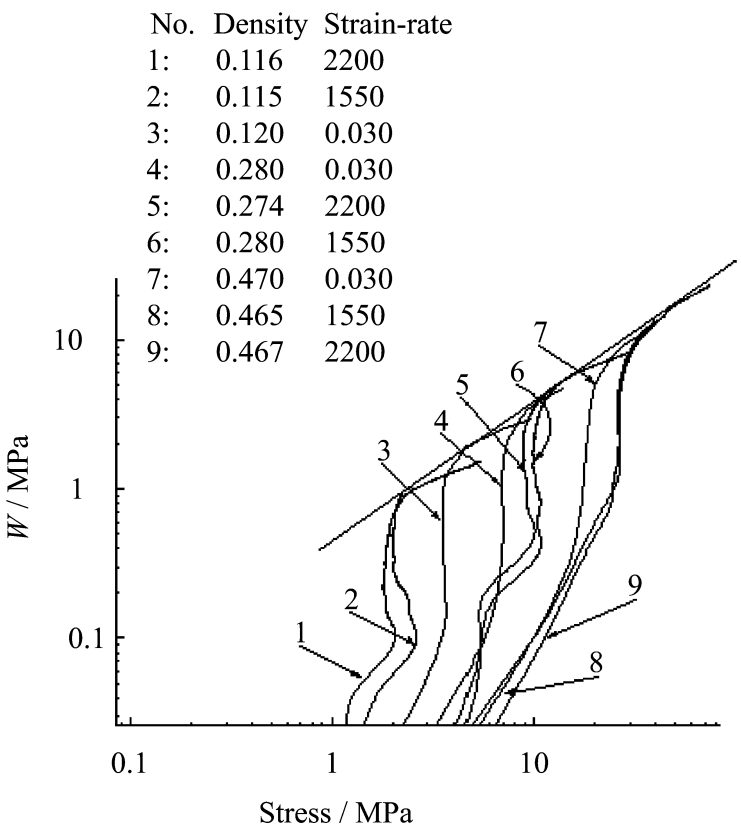

图 2　复合泡沫塑料能量吸收图

Fig. 2　Energy absorption diagram of syntactic foams

$$W = \int_0^{x_m} e \cdot dX \qquad (3)$$

直接由实验获得的应力-应变曲线即可得到 $E-e_m$ 曲线, $I-e_m$ 曲线和 $W-e_m$ 曲线(能量吸收图)。

图 2 给出了玻璃球含量为 10% 的三种密度泡沫塑料在不同应变率条件下的能量吸收图。从图中可以看出, 聚氨酯复合泡沫塑料在实验所用各种密度和应变率条件下的最佳吸能点的包络线是同一直线, 且最佳吸能点可以看成仅与密度有关, 而与应变率基本无关。这与文献[4]得到的关于普通硬质聚氨酯泡沫塑料的吸能性能的结论相类似。利用这一性质, 只需要几条吸能曲线就能画出这条包络线来, 而且可以利用插值的方法找到不同密度材料的最佳吸能点和所对应的应力, 而不必考虑应变率因素。

图 3 为玻璃球含量为 10% 的中、高密度复合泡沫塑料在不同应变率下的吸能率曲线和理想吸能率曲线。由图可见, 高密度泡沫塑料的吸能效果不如中密度材料, 这说明随着密度的增大吸能率是降低的。而应变率对吸能率的影响并不大, 总的趋势是随应变率的增大材料的吸能率稍有增加。

此外, 对比图 2 和图 3 的结果发现, 吸能率最高的点与能量吸收图上相应的最佳吸能点是相对应的。因此, 当选择硬质聚氨酯(复合)泡沫塑料作为能量吸收材料时, 要确定合适的材料参数, 只需在材料的最佳吸能点的包络线上选取适当的应力, 然后用插值的方法来得到材料的密度。

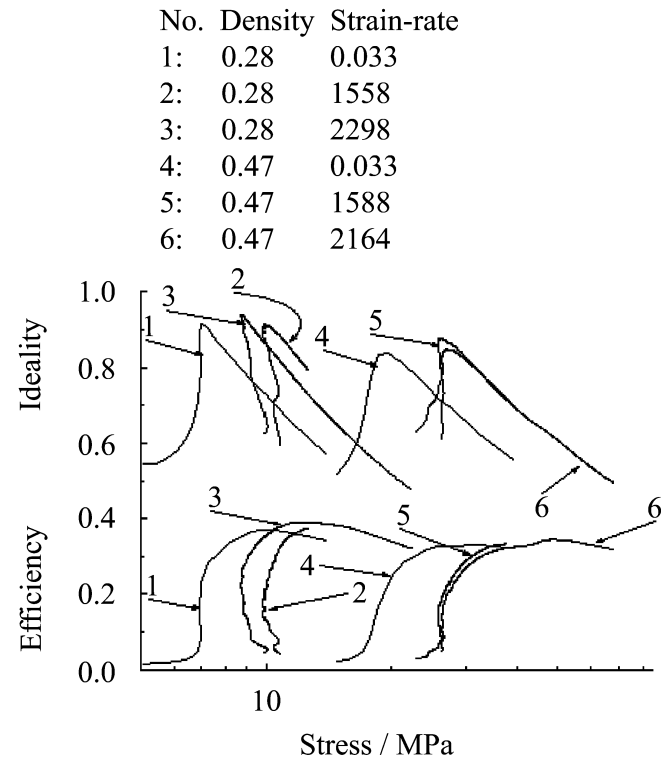

图 3　复合泡沫塑料吸能率和理想吸能率

Fig. 3　Efficiency and ideality curves of syntactic foams

2.3　动态破坏机理分析

图 4 为高密度材料在试件横截面内的破坏形貌。可见, 动态冲击后, 试件横截面内存在明显的破坏痕迹, 贯穿胞体的裂纹比比皆是, 且主要表现为骨架材料的破裂。同时, 也看到不少胞体基本完整, 这显示出横截面内变形和破坏的不均匀性。根据动态压缩试件变形和受力的特点不难推断: 惯性力导致的胞体失效主要体现在试件表面附近并远离试件端部的地方, 失效裂纹快速贯通, 形成的宏观碎块并携带一部分能量从试件的表面崩出, 从而造成滑轮状的宏观破坏形貌[7]。

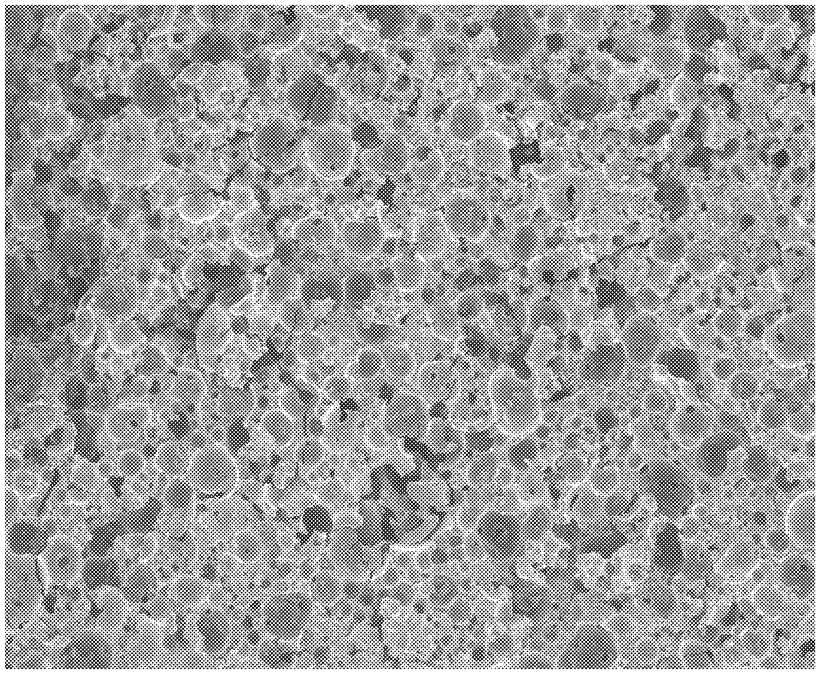

图 4　横截面内的破坏形貌

Fig. 4　The failure morphology of syntactic foam (in transverse section)

为进一步确定复合泡沫塑料的动态失效机理, 在较高放大倍数下观察了一些胞体的破坏形貌(如图 5 所示)。可见, 胞体的破坏形式与准静态压缩的情形大体相同[3,7], 也有沿经线方向的张开型裂纹、与压缩方向成 45 度角的剪切裂纹和赤道面附近的弯折破坏。图 5(a) 为横截面内胞体穿孔处的纵横裂纹, 尤其当穿孔位于胞体的底部时, 会在穿孔处沿经线方向发出辐射状裂纹; 图 5(b) 为纵向截面内与压缩方向成 45 度角的胞体壁上的剪切裂纹; 图 5(c) 为横截面内观察到的垂直于载荷方向赤道面附近的裂纹。

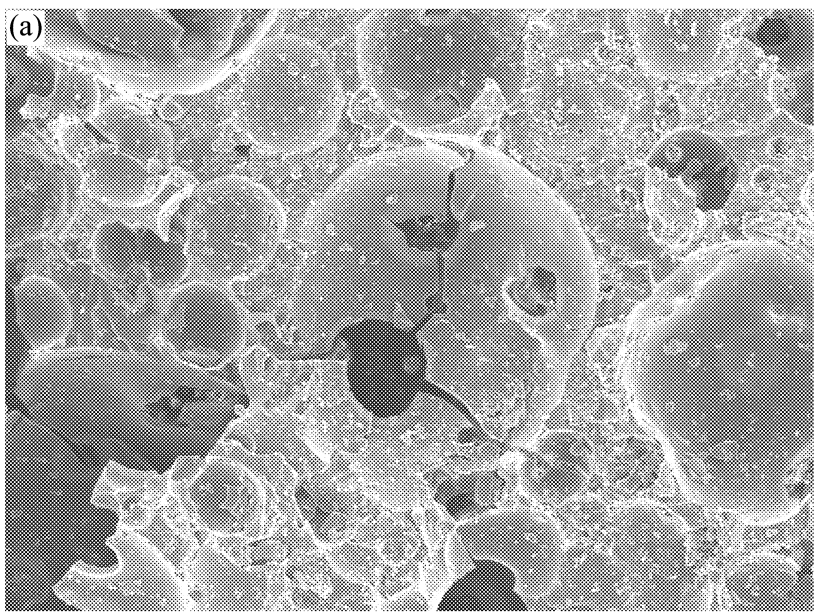

图 5(a) 横截面内的孔边裂纹

Fig. 5(a) Cracks at the edge of a cell hole (in transverse section)

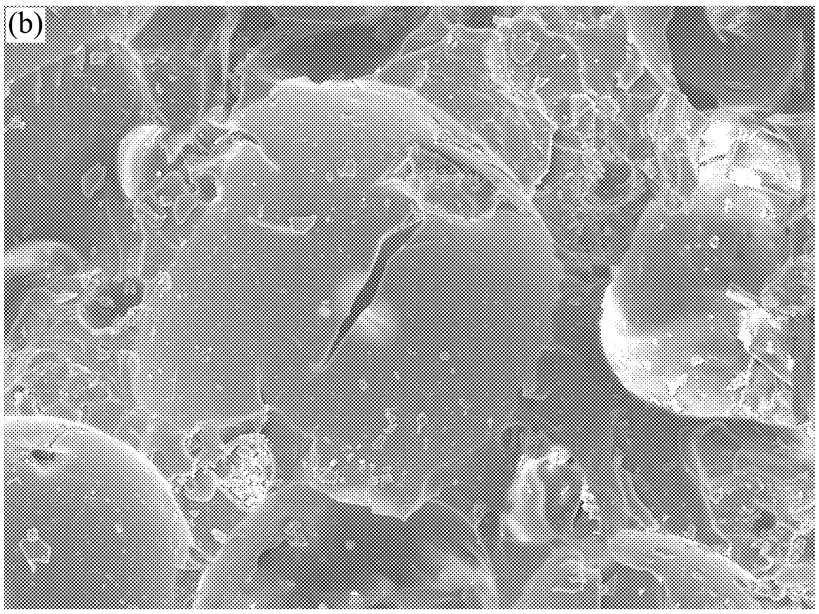

图 5(b) 纵向截面内的剪切裂纹

Fig. 5(b) Shear failure on a cell wall (in longitudinal section)

此外, 扫描电镜的观察还表明: 复合泡沫塑料在动态加载时, 惯性力在泡沫塑料胞体的破坏中起了一定的作用。同时, 胞体内来不及流动的气体也会对

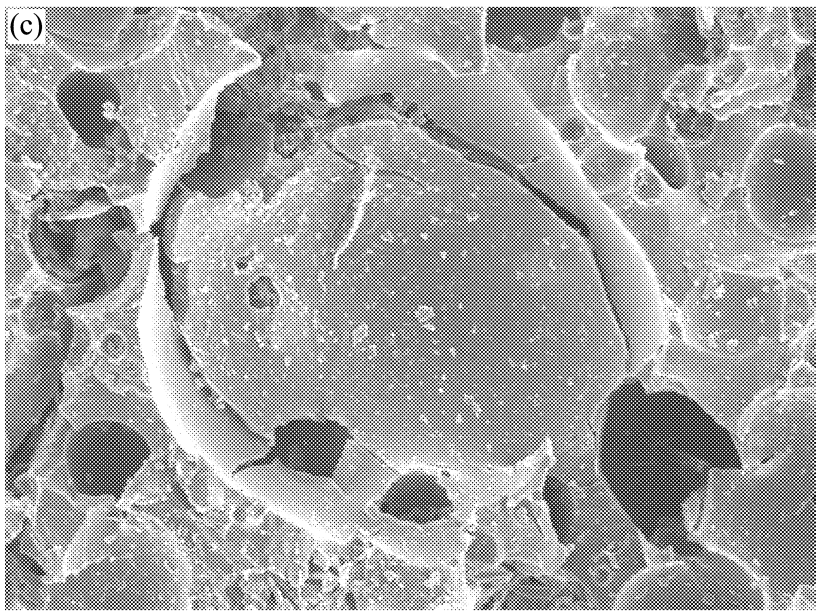

图 5(c) 横截面内的弯折破坏裂纹

Fig. 5(c) Bending breakage of a cell wall (in transverse section)

材料的破坏产生影响。因为高应变率大变形压缩时, 胞体内气体处于绝热压缩状态, 陡增的内压会使胞体壁的侧压迅速上升, 有可能加速弯曲应力对胞体赤道面附近造成的破坏, 形成所谓的 "爆炸" 现象。

3 结 论

(1) 空心玻璃微球填充聚氨酯复合泡沫塑料的动态力学性能主要由密度因素决定, 应变率效应只在高密度材料情况中才表现得比较明显。

(2) 不同应变率和密度条件下, 复合泡沫塑料最佳吸能点的包络线是同一条直线, 吸能率最高的点与能量吸收图上的最佳吸能点相对应。

(3) 复合泡沫塑料胞体的动态破坏形式主要有弯折、拉伸和剪切三种, 但与准静态压缩相比, 胞体弯折破坏的比例明显增加。此外, 惯性力和胞体内的气体压力对胞体的动态破坏也有一定的作用。

参考文献:

[1] Hilyard N C ed. Mechanics of Cellular Plastics [M]. Applied Sci Publisher, 1982.

[2] Plastinin A V, Silvestrov V V. The effect of strain rate on deformation and fracture of spheroplastic [A]. Proceedings of 2nd ISIE' 96, Beijing [C]. 1996. 170- 175.

[3] 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]. 力学 2000 会议文集 [C]. 北京: 气象出版社, 584-586.

[4] 胡时胜, 刘剑飞, 王 梧. 硬质聚氨酯泡沫塑料的缓冲吸能特性评估 [J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(1): 42- 47.

[5] Miltz J, Gruenbaum G. Evaluation of cushioning properties of plastic foams from compressive measurements [J]. Polym Eng Sci, 1981, 21(15): 1010- 1014.

[6] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids: Structures & Properties [M]. Pergamon Press, 1988.

[7] 严寒冰. 复合泡沫塑料静动态力学性能分析 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2000.