复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 28 卷 第 3 期 6 月 2011 年
Vol. 28 No. 3 June 2011

文章编号：1000-3851(2011)03-0103-06

聚氨酯泡沫铝复合材料动态力学实验

谢卫红[*1,2]，杜红涛[1,2]，李顺才[3]

（1. 军队“2110 工程”防护材料重点实验室，徐州 221000；2. 江苏徐州空军学院 机场工程系，徐州 221000；
3. 徐州师范大学 工学院，徐州 221116）

摘 要： 通过在开孔泡沫铝中填充聚氨酯得到了聚氨酯泡沫铝，利用 Hopkinson 杆对泡沫铝与泡沫聚氨酯组成的三维连续网络增强复合材料进行了在不同相对密度、应变率和聚氨酯含量下的动态压缩实验。结果表明，在相同应变率和相对密度下，与泡沫纯铝相比，聚氨酯泡沫铝屈服强度和压缩应变量显著增加，而且应力-应变曲线出现明显的抖动。随着应变的不断增大，应力也逐渐增加，在达到某一相同的应变时，聚氨酯泡沫铝的应力值较高，吸能量也较多。另外，当应变率增加时，聚氨酯泡沫铝表现出很明显的应变率效应。

关键词： 泡沫铝；聚氨酯泡沫铝；Hopkinson 杆实验；动态力学性能

中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Experimental study on dynamic mechanical performance of polyurethane – aluminum foams composites

XIE Weihong[*1,2], DU Hongtao[1,2], LI Shuncai[3]

(1. Key Laboratory of Protective Materials, The Military 2110 Project, Xuzhou 221000, China;
2. Department of Airport Engineering, Xuzhou Airforce College, Xuzhou 221000, China;
3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The polyurethane-aluminum foam was fabricated by filling the open-cell aluminum foam with polyurethane. Making use of the Hopkinson pressure bar, the dynamic compression experiments have been carried out to reinforced composites of three-dimensional continuous network composed of aluminum foam and polyurethane under different relative density, strain rate and polyurethane content. The experiment results indicate that the yield strength and the compression strain of polyurethane-aluminum foam are significantly improved, compared with the aluminum foam under the identical strain rate and relative density, and its stress – strain curve displays some obvious fluctuations. With the increase of the strain, the stress also increases and when the strain reaches a certain value, the stress corresponding to the polyurethane-aluminum foam is higher and its energy absorption is more than that of the aluminum foam. Furthermore, when the strain rate increases, polyurethane-aluminum foam presents an obvious effect of strain rate.

Keywords: aluminum foam; polyurethane-aluminum foam; Hopkinson bar experiment; dynamic mechanical performance

目前有关泡沫铝动态力学行为和变形机制的研究在国内外已有不少相关文献，已有的工作在泡沫铝特征参数如相对密度、孔径等因素对其动态力学性能、吸能性及应变率敏感性的影响等方面还缺乏系统而深入的研究，且主要工作是针对少数几种较规则孔形状的低密度闭孔泡沫铝[1-5]。由于开孔泡沫铝具有特殊的物理和力学性能，特别是可承受基本恒定、低水平应力而产生大范围的变形，已在汽车、航空航天、铁路运输、建筑等行业得到了广泛应用。目前，由于采用实验方法测试材料在高应变率下的应力-应变行为的困难性，材料性能的研究多集中在准静态方面，该材料动态性能的研究结果有限[6-10]。为有效保证设备和人员在战争中的生存安全，增强防护工事防

收稿日期： 2010-06-21；**收修改稿日期：** 2010-11-04
基金项目： 国家自然科学基金(50974107)
通讯作者： 谢卫红，博士，教授，硕士生导师，从事工程力学和伪装与防护工程及其材料研究 E-mail：xie621022@126.com

护能力，需研发既能有效抵抗爆炸载荷破坏，又具有自身重量轻、装拆方便的作战防护装备器材。本文作者对泡沫铝与高分子材料泡沫聚氨酯组成的三维连续网络增强复合材料进行了动态力学性能实验研究，该研究结果对我军今后的防护设施和军用装备设计具有重要军事意义。

1　实验方法

1.1　实验材料的制备与设计

泡沫铝由上海众汇泡沫铝材有限公司提供的采用高压渗流法制造的开孔泡沫铝板材，通过线切割将板材加工成直径为 74.00 mm、厚为 15.00 mm 的 48 个圆柱形薄试件待用，见图 1。

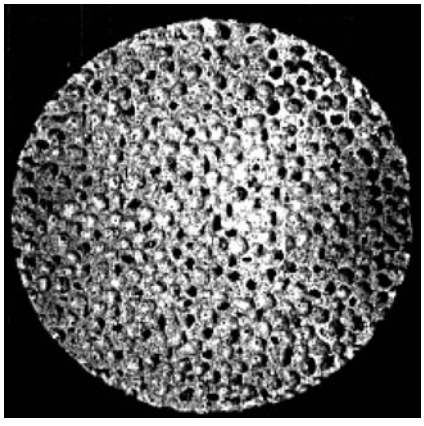

图 1　泡沫纯铝试件

Fig. 1　Pure aluminum foam specimen

聚氨酯由白料（聚醚三元醇：N303，羟值为 470 mgKOH/g，金陵石化公司化工二厂）和黑料（甲苯二异氰酸酯：PM200，烟台万华聚氨酯有限公司）按其先后顺序以质量比 1∶1 混合后（所得泡沫聚氨酯的密度约为 0.3 g/cm^3），迅速将其倒入装有泡沫纯铝试件的密闭容器（将废旧塑料瓶进行改装后作为反应容器）中自行加压发泡，使发泡产生的聚氨酯泡沫尽可能多的填充到泡沫铝试件的孔隙之中，打磨后得到聚氨酯泡沫铝的 24 个复合试件（见图 2）。经过 40 ℃恒温固化和自然风干后，再称其质量，通过泡沫纯铝的质量增量来确定聚氨酯的填充量。为便于后文的分析，将所有试件按相对密度的升序变化排列。

1.2　仪器调试过程与波形分析

试件制备完成后，对 4 组（每组 12 个）试件，设计了 0.3、0.4、0.6 MPa 三种气压的动态冲击实

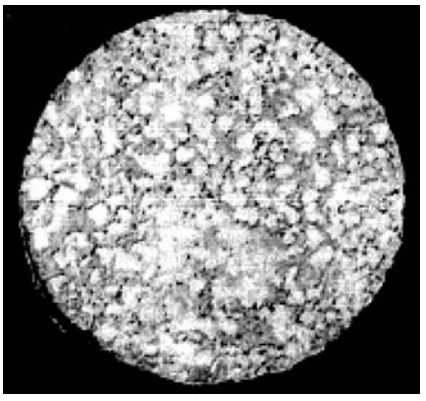

图 2　聚氨酯泡沫铝试件

Fig. 2　Specimen of polyurethane-aluminum foam

验。实验中，首先记录了超动态应变仪标定时的波形和不加试件进行冲击时，输入、输出杆中的波形。在外界干扰信号及杆的弥散效应等因素对实验的影响可以忽略的情况下，采集到的实验数据比较可靠。根据 Hopkinson 杆实验技术原理，对记录的入射波、反射波和透射波的原始数据进行处理，可以得到泡沫铝和聚氨酯泡沫铝的动态应力-应变曲线，如图 3 所示。可以看出，泡沫纯铝试件动态曲线与准静态曲线相比，两者的压缩应力-应变响应具有相似的 3 阶段特征：线弹性段、塑性坍塌平台段和密实段。与准静态压缩相比，动态压缩弹性模量有所增大。此外，准静态压缩的应力-应变曲线非常光滑，说明试样的变形过程非常平稳；而动态压缩下的曲线在经过弹性段后有明显的抖动，这是由于泡沫铝具有较高的脆性，在压缩变形过程中，经过弹性变形段后，泡沫铝内部某些相对薄弱的区域发

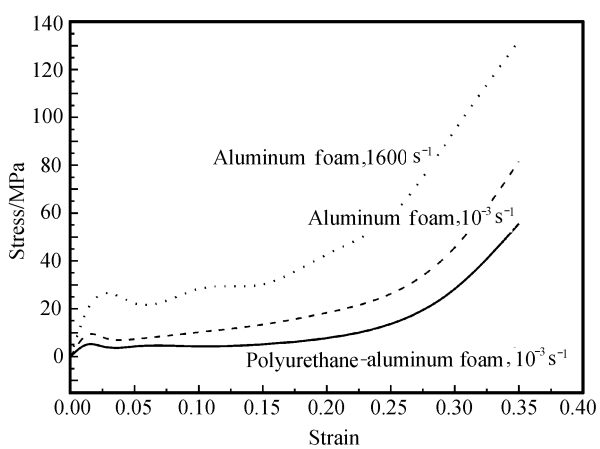

图 3　开孔泡沫铝和聚氨酯泡沫铝的应力-应变曲线

Fig. 3　Stress - strain curve of open-cell aluminum foam and polyurethane-aluminum foam

生脆性坍塌导致平台段曲线的起伏。聚氨酯泡沫铝在静态压缩下也呈现显著的3段式，但是其屈服强度比泡沫纯铝低很多。

2 结果分析与讨论

2.1 泡沫纯铝动态力学性能分析

2.1.1 相对密度对泡沫纯铝动态力学性能的影响

图4是相对密度不同的试件在不同应变率($\dot{\varepsilon}$=1000、1600、1900 s^{-1})下的应力-应变曲线。在各图中可取2%应变量对应的应力值近似为屈服强度，10%应变量对应的应力值为塑性平台段的流变应力$\sigma_{0.1}$。经过对比分析，在相同应变率下，相对密度较大的试件，其屈服强度和流变应力也较大，进入密实阶段所对应的应变明显变小。泡沫铝相对密度的增大意味着孔隙率的降低，也就是单位截面上基体材料所占比例的增大。因此，相对密度大的试件其壁在破坏过程中的弯矩小，致使其抖动幅度变小，进入致密强化阶段其应变减小，对应于Gibson L J等[11]所建立力学模型中骨架部分的尺寸增大，因此，随相对密度的增大泡沫铝的力学性能增强。

2.1.2 应变率对泡沫纯铝动态力学性能的影响

为研究应变率对动态力学性能的影响，通过图4的应力-应变曲线，筛选出试件的相关数据见表1。对比上述数据发现，试件38相对试件3应变率上升18.75%时，屈服强度提高了8.1%；试件1相对试件2的应变率上升60%时，屈服强度提高了21.4%；试件6相对试件8的应变率上升90%时，屈服强度提高了45.3%。

图5为三种应变率下相同相对密度试件的应力-应变曲线。对比上述分析数据与图5中应力-应变曲线，相对密度相同的试件，其屈服强度随应变率的上升而提高，且应变率增幅越大，屈服强度提高的幅度也越大，但是相对增幅有所减小；同时，随着应变率的升高，曲线的抖动幅度明显变小，而且进入致密强化阶段的应变变小。

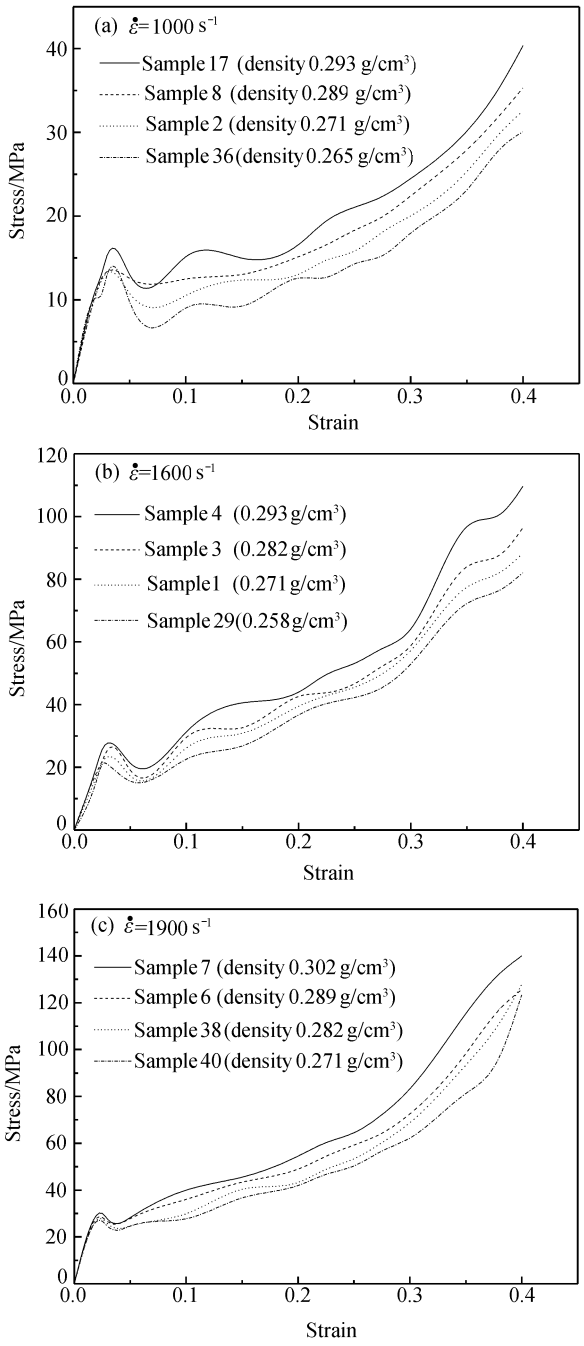

图4 三种应变率下不同相对密度泡沫纯铝试件的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain pure aluminum foam curves of samples with different relative densitines at three strain rates

表1 泡沫纯铝压缩力学性能对比

Table 1 Comparison of compressing mechanical behavior of pure aluminum foam

Sample No.	Pressure/MPa	Relative density	Strain rate/s^{-1}	Yield strength /MPa
2	0.3	0.271	1000	14.0
1	0.4	0.271	1600	17.0
38	0.6	0.282	1900	20.0
8	0.3	0.289	1000	14.8
3	0.4	0.282	1600	18.5
6	0.6	0.289	1900	21.5

Relative density—Ratio of porous material's apparent density to based material's density.

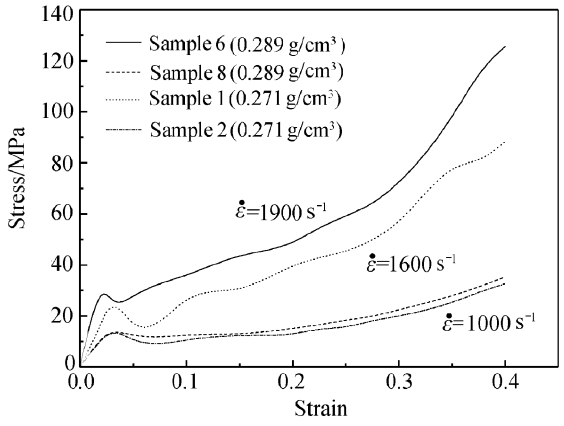

图 5　三种应变率下相同相对密度试件的应力-应变曲线

Fig. 5　Stress - strain curves of samples with the same relative density at three strain rates

根据以上结论，可令 $\sigma_y = c(\dot{\varepsilon})^n$，应变率敏感度 $n<1$、常量 $c>0$，对上式两边同时取对数得 $\ln\sigma_y = \ln c + n\ln\dot{\varepsilon}$，两边求导数得

$$n = \frac{\ln\sigma_1 - \ln\sigma_2}{\ln\dot{\varepsilon}_1 - \ln\dot{\varepsilon}_2} = \frac{\ln(\sigma_1/\sigma_2)}{\ln(\dot{\varepsilon}_1/\dot{\varepsilon}_2)}$$

即 $\partial\ln\sigma_y = n\partial\ln\dot{\varepsilon}$，将上表中数据代入得 $n_{1,2}=0.412$，$n_{2,38}=0.556$，$n_{3,8}=0.474$，$n_{6,8}=0.581$。

上述敏感度系数明显偏大，由此可知，应变率对屈服强度的影响不可忽略。

2.2　聚氨酯泡沫铝的动态力学性能分析

2.2.1　聚氨酯泡沫铝动态压缩时的应力-应变曲线

图 6 为聚氨酯泡沫铝试件在应变率为 1000、1600、1900 s^{-1}下动态压缩时的应力-应变曲线。从图 6(a)中的曲线可以看到，在低应变率的动态压缩下，聚氨酯泡沫铝基本上只表现出了两个变形阶段的特征，即弹性段和应力上升的塑性段，没有出现明显的密实段。这是由于撞击杆的速度较低，撞击能量不足以将聚氨酯泡沫铝压实，所以压缩曲线不完整。而应变率相对较高的图 6(b)和图 6(c)中的应力-应变曲线却表现出了线弹性段、应力上升的塑性段和密实段 3 个变形阶段的特征。同种应变率下线弹性阶段基本重合，说明复合材料的弹性模量和相对密度无关，这同时也说明聚氨酯泡沫铝在压缩初期主要由泡沫铝骨架承受应力。

在塑性段曲线有所抖动，而且随着相对密度和应变率的上升抖动减弱，而泡沫纯铝基本上未出现明显抖动，这说明抖动在很大程度上是由聚氨酯引起的。

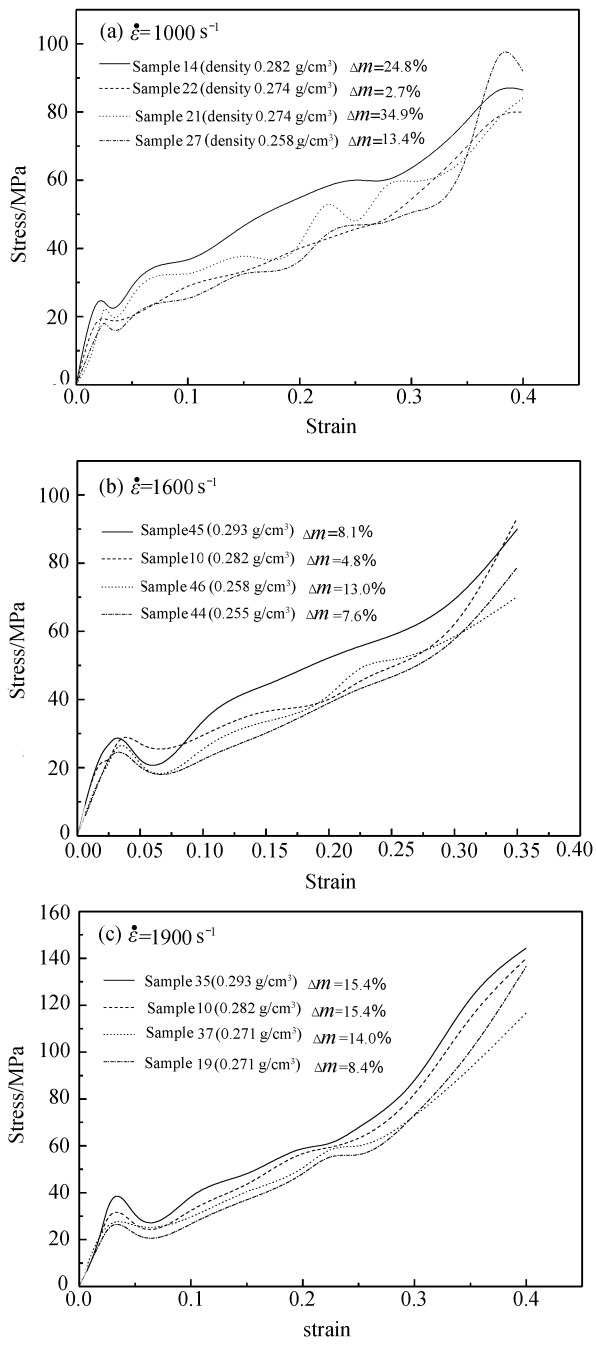

图 6　三种应变率下聚氨酯泡沫铝的应力-应变曲线

Fig. 6　Stress - strain curves of polyurethane-aluminum foams at three strain rates

2.2.2　相对密度对聚氨酯泡沫铝动态力学性能的影响

当应变率和聚氨酯含量相同时，考虑相对密度对应力的影响。以试件 11 和 35 为例，如图 7 所示。比较两条曲线可以发现，试件 11 的屈服强度 $\sigma_s=24.5$ MPa，流变应力 $\sigma_{0.1}=32$ MPa；试件 35 的屈服强度 $\sigma_s=26.3$ MPa，流变应力 $\sigma_{0.1}=36$ MPa，

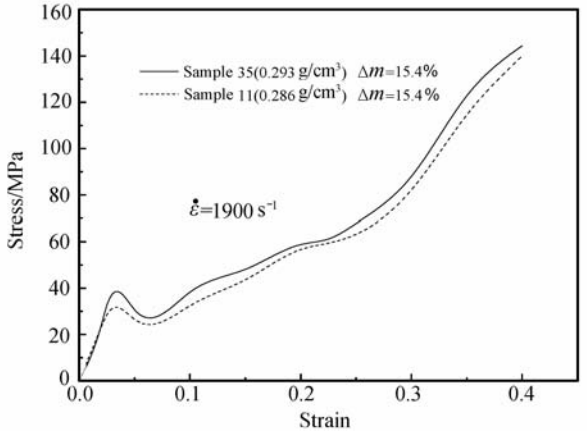

图 7 不同相对密度聚氨酯泡沫铝试件在应变率为 1900 s^{-1}下的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress - strain curves of polyurethane-aluminum foam samples with different relative densities at strain rate of 1900 s^{-1}

后者的屈服强度和流变应力比前者分别升高了 7.3%和 12.5%。可见，随着泡沫铝相对密度的提高，试件的屈服强度和流变应力都显著提高。在线弹性变形段，2 条曲线几乎重合，即在压缩初期主要由泡沫铝骨架承受压力。

2.2.3 应变率对聚氨酯泡沫铝动态力学性能的影响

图 8 为同等条件下聚氨酯泡沫铝在不同应变率时的应力-应变曲线图。由图可知，试件 27 和 46 的相对密度相同，聚氨酯含量基本一致。试件 46 的动态压缩曲线与试件 27 相比除弹性段斜率差异不大外，屈服强度和流变应力都明显上升，试件 46 的 σ_s=18.5 MPa，$\sigma_{0.1}$=26 MPa，试件 27 的 σ_s=14.3 MPa，$\sigma_{0.1}$=24 MPa。即聚氨酯泡沫铝的屈服强度和流变应力分别提高了 29.37%和8.33%，而且随应变率的增大致密化的应变起点数值明显变小。

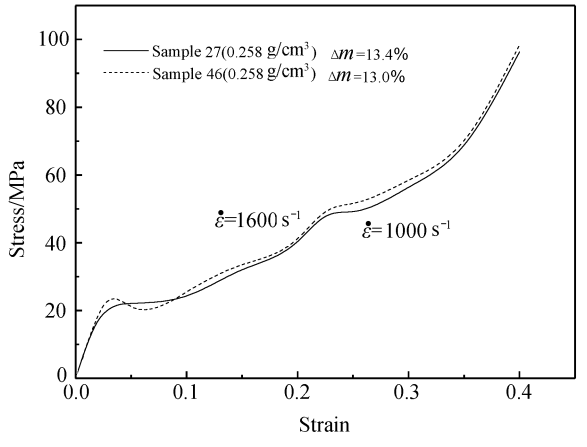

图 8 同等条件聚氨酯泡沫铝在不同应变率下的应力-应变曲线对比

Fig. 8 Stress - strain curves of polyurethane-aluminum foam at different strain rates

2.2.4 聚酯含量对聚氨酯泡沫铝动态力学性能的影响

在图 9 中，试件 21、22、32 具有相同的相对密度，32 是泡沫纯铝试件，21、22 是聚氨酯含量不同泡沫铝试件。在相同的应变率条件下，其屈服强度如表 2 所示。从表中数据分析，泡沫聚氨酯质量的增加对屈服强度变化的影响呈线性或幂指数关系。

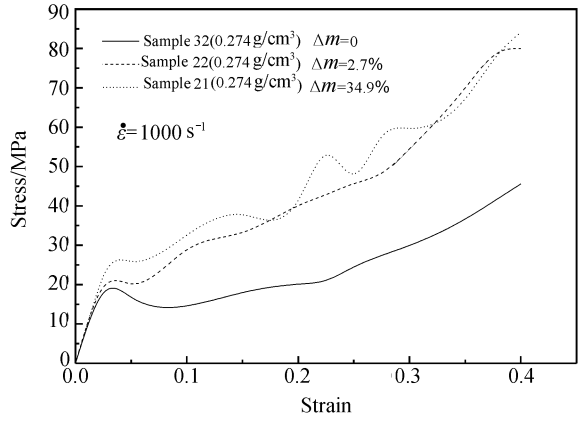

图 9 应变率为 1000 s^{-1}时聚氨酯泡沫铝的应力-应变曲线

Fig. 9 Stress - strain curves of polyurethane-aluminum foam at strain rate of 1000 s^{-1}

表 2 聚氨酯含量与屈服强度的关联数据

Table 2 Associated data of the polyurethane's content and yield strength

No.	σ_s/MPa	Δm/%	$\Delta\sigma_s$/MPa
32	14.2	0.0	0.0
22	14.5	2.7	0.3
21	16.4	34.9	2.2

Note: σ_s—Yield strength; Δm—Increment of mass; $\Delta\sigma_s$—Variation of yield strength compared with sample 32.

3 结 论

(1) 采用 Hopkinson 杆对泡沫铝和在开孔泡沫铝中填充聚氨酯得到的聚氨酯泡沫铝组成的三维连续网络增强复合材料进行了动态压缩实验，得到了在不同相对密度、应变率和聚氨酯含量下复合材料的动态压缩力学性能。

(2) 泡沫铝和聚氨酯泡沫铝均具有非常明显的应变率效应；在相同应变率和相同相对密度下，聚氨酯泡沫铝与泡沫纯铝相比，其屈服强度和压缩应变量显著增加，而且曲线出现明显的抖动。随着应

变的不断增大，应力也逐渐增加，在达到某一相同的应变时，聚氨酯泡沫铝的应力值较泡沫铝高。

参考文献：

[1] Wei J N, Cheng H F, Gong C L, et al. Grain boundary peak in a foamed Zn－Al eutectoid alloy[J]. Chinese Physics Letters, 2002, 19(3): 381-384.

[2] 刘培生. 多孔材料引论[M]. 北京：清华大学出版社，2004：98-208.

[3] 赵万年，赵乃勤，郭新权. 新型功能材料泡沫铝的研究进展[J]. 金属热处理，2004，29(6)：7-11.
Zhao Wannian, Zhao Naiqin, Guo Xinquan. Study progress for new type functional materials of foam aluminum [J]. Heat Treatment of Metals, 2004, 29(6): 7-11.

[4] 蒲怀强. 泡沫铝材料的工程应用研究[D]. 重庆：重庆大学，2005.

[5] 黄小清，刘逸平，汤立群，胡玲玲，张　红. 基于相对即时密度的泡沫铝材料力学性能研究[J]. 实验力学，2004，19(2)：170-177.
Huang Xiaoqing, Liu Yiping, Tang Liqun, Hu Lingling, Zhang Hong. An experimental study on the mechanic behaviors of aluminum foam based on the relative current density[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(2): 170-177.

[6] 于英华，杨春红. 泡沫铝夹芯结构的研究现状及发展方向 [J]. 机械工程师，2006(3)：43-45.
Yu Yinghua, Yang Chunhong. Study on the structure filled with aluminlum foam and its developing tendency [J]. Mechanical Engineer, 2006(3): 43-45.

[7] 梁晓军，朱勇刚，陈　峰，等. 泡沫铝芯三明治板的粉末冶金制备及其板/芯界面研究 [J]. 材料科学与工程学报，2005，23(1)：77-80.
Liang Xiaojun, Zhu Yonggang, Chen Feng, et al. Research on preparation of aluminium foam sandwich by powder metallurgical method and face plate/foam core interfacial microstructure [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2005, 23(1): 77-80.

[8] Conde Y, Pollien A, Morternsen A. Functional grading of metal foam cores for yield－limited lightweight sandwich beams[J]. Scripta Mater, 2006, 54: 539-542.

[9] Cheng H F, Han F S. Compressive deformation behavior and energy absorbing characteristic of open cell aluminum foam filled with silicate rubber [J]. Scripta Materialia, 2003, 49(6): 586-586.

[10] Cheng H F, Huang X M, Xue G X, et al. Compressive deformation behavior and energy absorption characteristic of aluminum foam with elastic filler [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2004, 14(5): 928-933.

[11] Gibson L J. Modelling the mechanical behavior of cellular materials [J]. Material Science and Engineering A, 1989, 110: 1-36.

[12] Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46: 559-632.

[13] 卢子兴，王建华. 增强聚氨酯泡沫塑料力学行为的研究[J]. 复合材料学报，1999，16(2)：39-45.
Lu Zixing, Wang Jianhua. Investigation into mechanical behavior of two reinforced foam plastics [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1999, 16(2): 39-45.

[14] 王仕财，朱春凤. 聚氨酯-纳米 $CaCO_3$/PVC 复合材料力学性能 [J]. 复合材料学报，2009，26(3)：45-49.
Wang Shicai, Zhu Chunfeng. Mechanical properties of polyurethane－nano－$CaCO_3$/polyvinyl chloride composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(3): 45-49.

[15] 于思荣，罗彦茹，张英波，刘家安. SiC_p/ZL104 泡沫复合材料的阻尼性能 [J]. 复合材料学报，2007，24(1)：65-69.
Yu Sirong, Luo Yanru, Zhang Yingbo, Liu Jiaan. Damping properties of SiC_p/ZL104 composite foams [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 65-69.