文章编号：1001-1455(2014)03-0373-06

聚氨酯泡沫铝动力学性能实验及本构模型研究*

张 勇[1,2]，陈 力[3]，陈荣俊[2]，谢卫红[2]
(1. 中国矿业大学力学与建筑工程学院，江苏 徐州 221008；
2. 空军勤务学院机场工程系，江苏 徐州 221000；
3. 中国人民解放军理工大学国防工程学院，江苏 南京 210007)

摘要：为了改进泡沫铝的动态吸能性能，将聚氨酯填充到开孔泡沫铝中制备成复合材料。通过霍普金森杆(SHPB)冲击实验，研究包含相对密度、应变、应变率和聚氨酯含量等影响因素的聚氨酯泡沫铝材料的动力学性能，并建立了动态本构模型。实验结果表明，聚氨酯泡沫铝的动态弹性模量与相对密度无关，屈服强度和流变应力与应变率和泡沫铝的相对密度成正比；聚氨酯泡沫铝的屈服强度与泡沫聚氨酯质量增加近似呈线性关系。所建立的动态本构模型在相对密度和应变率在一定的变化范围内与实验数据吻合较好。

关键词：固体力学；动态本构模型；SHPB；聚氨酯泡沫铝；冲击荷载
中图分类号：O347.3；TB33 **国标学科代码**：13015 **文献标志码**：A

开孔泡沫铝具有三维连通的孔结构，通过向其孔洞中填入泡沫聚氨酯等黏弹性高分子材料，能够起到良好的缓冲、吸能和减震作用。利用聚氨酯泡沫铝复合材料的抗冲击性能和吸能特性，可以有效地提高抵抗爆炸等冲击作用所产生的危害，对制造抗冲击防护材料具有重要意义。然而，要成为性能优异的冲击吸能材料[1-7]，需要知道泡沫聚氨酯材料在填充到泡沫铝孔隙中后其压缩变形行为和吸能性。

在泡沫铝材料和聚氨酯材料的实验研究方面，V. S. Deshpande 等[8]通过实验得出泡沫铝的力学性能与应变率无关的结论；K. A. Dannemann 等[9]采用常规分离式霍普金森压杆技术实验，发现闭孔 Alporas泡沫铝具有明显的应变率效应；王永刚等[10]利用改进了的 SHPB 技术对泡沫铝进行了高应变率下的动态压缩实验，王志华等[11]利用 SHPB 实验技术和 MTS 材料试验机对开孔泡沫铝进行了准静态和动态压缩实验研究，卢子兴等[12]对高密度硬质聚氨酯泡沫塑料的拉伸力学性能进行了研究。在本构模型的研究中，主要成果有可用于金属大变形、高应变率和高温情况下的本构模型——Johnson-Cook 模型[13]，J. A. Sherwood 等[14]提出了考虑环境温度和相对密度及应变率等因素的经验型本构关系等，A. G. Hanssen 等[15]提出了泡沫铝在单轴受压或静水压力下的应变强化模型，胡玲玲等[16]提出了泡沫铝材料的一维黏塑性本构模型。以上研究成果主要是对泡沫金属和聚氨酯材料单独进行的。本文中对聚氨酯泡沫铝复合材料的动态力学性能进行较系统的实验研究，并通过考虑聚氨酯填充量对复合材料动力学性能的影响，提出适用于该复合材料的本构模型。

1 聚氨酯泡沫铝复合材料制备

采用高压渗流法制造开孔泡沫铝板材，并通过线切割将板材加工成直径 74.00 mm 的 48 个圆柱形薄试件待用；聚氨酯由白料(包括聚醚三元醇、发泡剂、催化剂、泡沫稳定剂等)和黑料(甲苯二异氰酸酯：PM200)按其先后顺序进行 1∶1 的质量比例混合(所得泡沫聚氨酯的密度约为 0.3 g/cm^3)以后，迅速将其倒入装有泡沫铝试件的密闭容器(将废旧塑料瓶进行改装后作为反应容器)中加压发泡(加压方法采用活塞手动加压)，使发泡产生的聚氨酯泡沫能尽可能多地填充到泡沫铝试件的孔隙之中。

经过打磨以后就得到聚氨酯泡沫铝的 48 个复合试件。经过 40 ℃恒温固化和自然风干后，再称其

* **收稿日期**：2012-11-13；**修回日期**：2013-04-27
基金项目：国家自然科学基金面上项目(51378016)
作者简介：张 勇(1980—)，男，博士研究生，讲师。

质量，通过泡沫铝的质量增量来确定聚氨酯的填充量。为便于分析，将所有试件按相对密度的升序变化排列。制备的 48 个试件分成 4 组，每组 12 个试件。

2 动态冲击实验

动态荷载利用直径 74 mm 的直锥变截面大直径 SHPB 装置施加冲击荷载，由于应变率只与子弹速度相关，而弹速取决于气压，因此设计了由 0.3、0.4、0.6 MPa 3 种气压大致得到的 1 000、1 600、1 900 s^{-1} 等 3 种应变率。图 1 是聚氨酯泡沫铝试件在应变率为 1 900 s^{-1} 下冲击前后的形状对比。

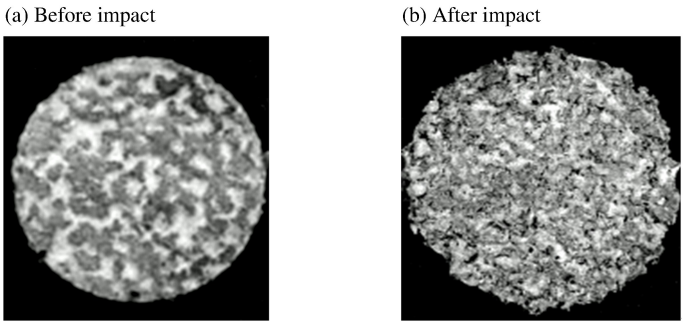


图 1 聚氨酯泡沫铝试件在应变率 1 900 s^{-1} 下冲击前后的形状对比

Fig. 1 Shape contrast of polyurethane foam aluminum test-pieces before and after impact at strain rate of 1 900 s^{-1}

图 2 给出了聚氨酯泡沫铝在应变率为 1 000、1 600、1 900 s^{-1} 等 3 种应变率下动态压缩时的应力应变曲线。从图 2(a)中可以看到，低应变率的聚氨酯泡沫铝基本上只表现出了 2 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。

应变率相对较高的图 2(b)～(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都是重合的，说明复合材料的动态弹性模量与相对密度无关；聚氨酯泡沫铝的塑性段曲线有所抖动，而且随着相对密度和应变率的上升波动减弱，这说明抖动除了泡沫铝的非线性行为以外，还有聚氨酯的影响因素；另外由图 2 可以看出，聚氨酯泡沫铝的屈服强度和流变应力随应变率的增加而提高。

由图 3 可知，泡沫聚氨酯质量的增加量与屈服强度的提高呈近似线性关系。

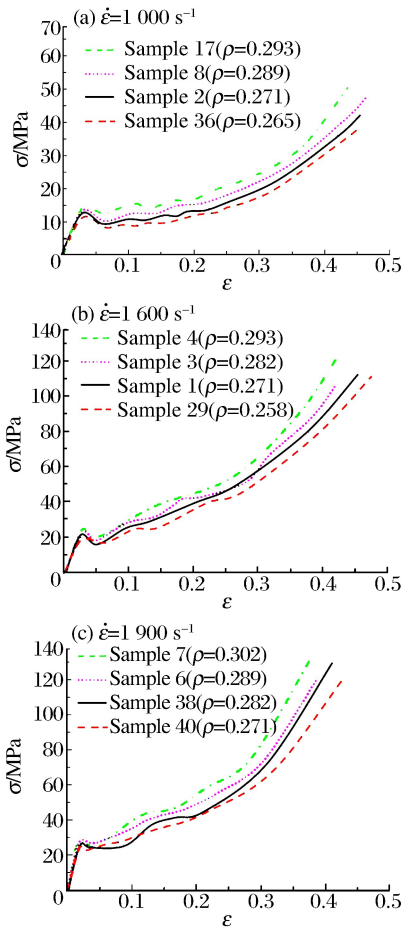


图 2 不同应变率下聚氨酯泡沫铝试件的应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of polyurethane foam aluminum test-pieces at different strain rate

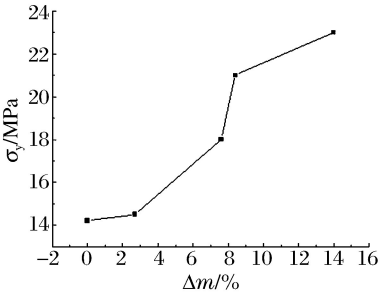


图 3 屈服强度与聚氨酯质量分数的关系

Fig. 3 The yield strength vs the mass of the polyurethane foam

3 聚氨酯泡沫铝动态本构模型的建立

文献[14]在建立聚氨酯泡沫本构关系时将环境温度和相对密度及应变率等因素考虑进去，提出了经验型本构关系：

$$\sigma = H(T)G(\rho)M(\varepsilon,\dot{\varepsilon})f(\varepsilon) \tag{1}$$

式(1)中环境温度 T 与相对密度 ρ 对应力的影响是单一的，与应变 ε、应变率 $\dot{\varepsilon}$ 基本上无关；而 $M(\varepsilon,\dot{\varepsilon})$ 则主要反映了应变率对应力的影响，形状函数 $f(\varepsilon)$ 定义为在某一参考相对密度、参考温度、准静态加载下的应力、应变的曲线函数。

胡时胜等[17]对本构关系(1)进行了修正，在修正的本构关系中不包含温度，关于应变率对应力的影响则采用基于热激活机制的 Seeger 模型，得到拟合的本构关系：

$$\sigma = \left[\frac{\rho}{\rho_0}\right]^A \varepsilon^{B\left(\frac{\rho}{\rho_0}-1\right)} \left[1 + C\lg\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right] \sum_{i=1}^{6} A_i\varepsilon^i \tag{2}$$

式中：$\dot{\varepsilon}_0$ 为选定的一种参考应变率，C 为拟合参数。

图 4 是聚氨酯质量分数与屈服强度的关系曲线图。根据图 4，本构关系的影响可近似取线性关系表示为：

$$P(m) = Hm + k$$

式中：m 为聚氨酯含量，H、k 为常数。

由本文实验数据进行分析可知，相对密度对应力的影响近似为线性关系，与本构关系(1)结论一致，可表示为：

$$G(\rho) = J(\rho - \rho_0) + 1$$

式中：J 为常数。

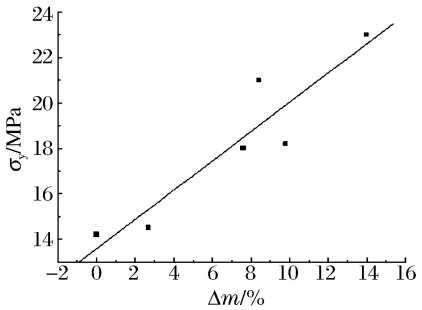


图 4 屈服强度与聚氨酯质量分数的数据拟合

Fig. 4 Data fitting of yield intensity vs mass of polyurethane

关于应变率对应力的影响仍采用本构关系(2)中的关系。最终可得拟合的本构方程为：

$$\sigma = P(m)G(\rho)M(\varepsilon,\dot{\varepsilon})f(\varepsilon) = (Hm + k)\ [J(\rho - \rho_0) + 1]\left(1 + C\lg\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\sum_{i=1}^{n} E_i\varepsilon^i \tag{3}$$

由图 4 拟合直线可得：$P(m) = 63.2m + 13.723$。相关系数 $R_1 = 0.929\ 96$，拟合效果很好。

当 $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0$、$\rho = \rho_0$、$m = 0$ 时，动态应力应变曲线便可确定形状函数 $\sigma = \sum_{i=1}^{n} E_i\varepsilon^i = f(\varepsilon)$ 的形式。显然，函数表达式中的参数越多，拟合效果会越好，但相应地也增加了计算的难度和复杂性，本文中选取 $n = 4$ 时的函数。

利用形状函数 $\sigma = \sum_{i=1}^{n} E_i\varepsilon^i = f(\varepsilon)$，令 $\rho = \rho_0 = 0.293$、$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 = 1\ 900\ s^{-1}$、$m = 0$、$n = 4$，利用试件 7、25、39、48 的应力应变曲线进行二次拟合曲线得：

$$y = -18\ 860x^4 + 21\ 117x^3 - 6\ 818.4x^2 + 913.79x$$

由相关系数 $R_2 = 0.962\ 9$ 可知，其拟合性比较好。

当 $\dot{\varepsilon} \neq \dot{\varepsilon}_0$，$\dot{\varepsilon} = 1\ 000\ s^{-1}$，$\rho = \rho_0 = 0.293$，$m = 0$ 时，由实验数据拟合得到 $C = 1.05$；

当 $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 = 1\ 900\ s^{-1}$、$\rho \neq \rho_0$、$= 0.282$、$m = 0$ 时，可拟合得到 $J = 22.34$；

则得聚氨酯泡沫铝的本构方程为：

$$\sigma = P(m)G(\rho)M(\varepsilon,\dot{\varepsilon})\,f(\varepsilon) = (63.2m + 13.723)\,[22.34 \times (\rho - 0.293) + 1]\left(1 + 1.05\lg\frac{\dot{\varepsilon}}{1\,900}\right) \times (-18\,860\varepsilon^4 + 21\,117\varepsilon^3 - 6\,818.4\varepsilon^2 + 913.79\varepsilon) \tag{4}$$

下面分析聚氨酯含量、应变率和相对密度不同时对拟合的本构模型应力应变曲线的影响并与实验数据对比。

由图 5 可知，聚氨酯泡沫铝的本构模型(4)在相对密度为 0.274～0.293 之间，应变率在 1 000～1 900 s^{-1}之间，其拟合结果与实际应力应变曲线吻合较好，特别是相对密度越接近 0.293，应变率越接近 1 900 s^{-1}，其拟合效果越好。

由图 5(e)可知，试件 36 的实验条件都处于相对密度和应变率适用范围的下限，所以拟合效果就比较差，但是在线弹性阶段和进入塑性阶段初期，其拟合效果比较好，塑性阶段进入密实阶段，拟合效果开始变差。

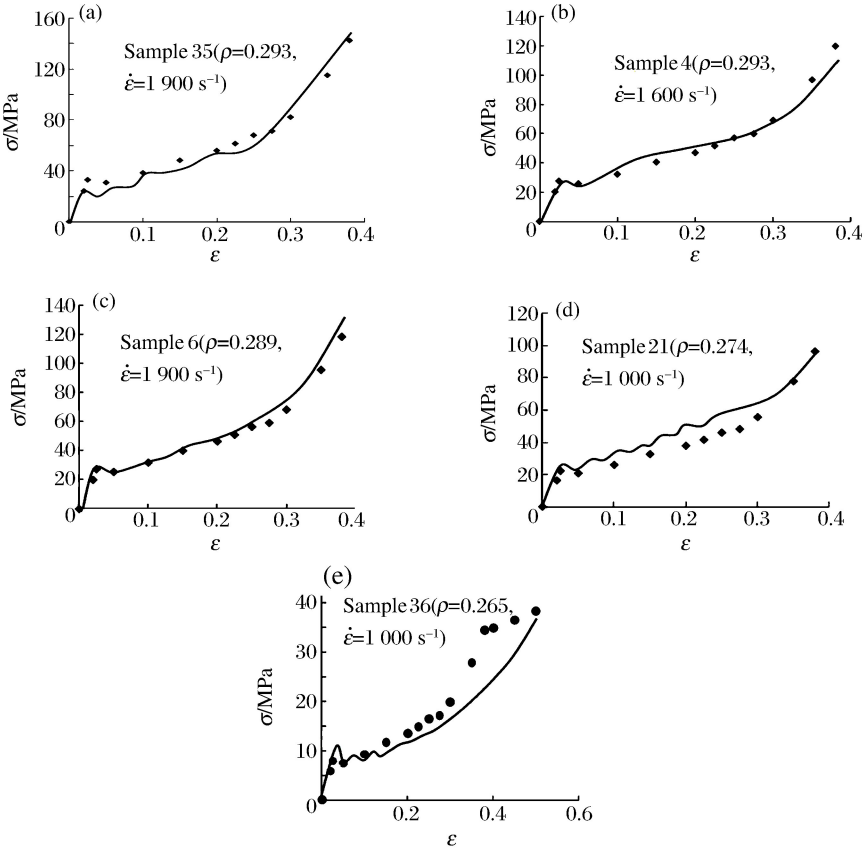


图 5 本构模型曲线与实验数据曲线对比

Fig. 5 Constitutive model vs experimental data curves

4 结 论

通过对聚氨酯泡沫铝冲击实验和动态本构模型的分析，可以得到以下结论：

(1)聚氨酯泡沫铝的动态弹性模量与相对密度无关。

(2)屈服强度和流变应力与应变率和泡沫铝的相对密度成正比。

(3)拟合的本构模型在相对密度为 0.274～0.293 之间，应变率在 1 000～1 900 s^{-1}之间，拟合结果与实际应力应变曲线吻合较好，特别是相对密度越接近 0.293，应变率越接近 1 900 s^{-1}，拟合效果越好；实验条件都处于相对密度和应变率适用范围的下限时，拟合效果开始变差，说明本构方程的使用有一定的局限性。

参考文献：

[1] Li Xu-hua, Yuan Qiao-long, Wang De-ning, et al. Cross-linked polyurethane with high thermal stability and low optical loss[J]. Materials and Devices for Optical and Wireless Communications, 2006,49(5):405-408.

[2] Sun Ming-cheng, Liu Fu-chun, Shi Hong-wei, et al. A study on water absorption in freestanding polyurethane films filled with nano-TiO_2 pigments by capacitance measurements[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009,22(1):27-34.

[3] Li Hai-bin, Tian Zhen, Zhang Ai-ying, et al. Synthesis and characterization of novel triblock copolymers comprising poly (tetrahydrofuran) as a central block and poly(γ-benzyl L-glutamate)s as outer blocks[J]. Frontiers of Materials Science in China, 2008,2(1):84-90.

[4] You Cao, Yu Jiang, Zhao Shu-lu, et al. Effect of montmorillonite on kinetics of polyurethane preparation reaction [J]. Chinese Chemical Letters, 2008,19(1):115-118.

[5] 穆建春,习会峰,龙志勤.不同孔隙率及孔径泡沫铝的力学与吸能特性研究[J].实验力学,2009(3):223-227.
Mu Jian-chun, Xi Hui-feng, Long Zhi-qin. Study on the mechanics and energy absorb property of aluminum foam in different void rate and different aperture[J]. Experiment Mechanics, 2009(3):223-227.

[6] Zhang Guo-qi, Wang Bing, Ma Li, et al. Energy absorption and low velocity impact response of polyurethane foam filled pyramidal lattice core sandwich panels[J]. Composite Structures, 2014,108:304-310.

[7] 赵军,侯兴勃,张丹.泡沫铝冲击吸能器工程设计研究[J].噪声与振动控制,2009,29(3):130-131,151.
Zhao Jun, Hou Xing-bo, Zhang Dan. Engineering design and study on the impact and energy absorb implement of aluminum foam[J]. Yawp and Vibraten Control, 2009,29(3):130-131,151.

[8] Deshpande V S, Fleck N A. High strain rate compressive behaviour of aluminium alloy foams[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000,24(3):277-298.

[9] Dannemann K A, Lankford J J. High strain rate compression of closed-cell aluminium foams[J]. Material Science and Engineering: A, 2000,293(1/2):157-164.

[10] 王永刚,胡时胜,王礼立.爆炸荷载下泡沫铝材料中冲击波衰减特性的实验和数值模拟研究[J].爆炸与冲击,2003,23(6):516-522.
Wang Yong-gang, Hu Shi-sheng, Wang Li-li. Shock attenuation in aluminum foams under explosion loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(6):516-522.

[11] 王志华,曹晓卿,马宏伟,等.泡沫铝合金动态力学性能实验研究[J].爆炸与冲击,2006,26(1):46-52.
Wang Zhi-hua, Cao Xiao-qing, Ma Hong-wei, et al. Experimental studies on the dynamic compressive properties of open celled aluminum alloy foams[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(1):46-52.

[12] 卢子兴,高镇同,朱汪鲲,等.聚氨酯泡沫塑料的强度与断裂韧性[J].力学学报,2000,32(5):625-632.
Lu Zi-xing, Gao Zhen-tong, Zhu Wang-kun, et al. Investigation on the fracture properties of polyurethane rigid foam plastics[J]. Mechanics Transaction, 2000,32(5):625-632.

[13] Johnson G R,Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperatures// Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics[C]. The Netherlands: The Hague, 1983:541-547.

[14] Sherwood J A, Frost C C. Constitutive modeling and simulation of energy absorbing polyurethane foam under impact loading[J]. Polymer Engineering & Science, 1992,32(16):1138-1146.

[15] Hanssen A G, Hopperstad O S, Langseth M, et al. Validation of constitutive models applicable to aluminium foams[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002,44(2):359-406.

[16] 胡玲玲,黄小清,张红,等.泡沫铝材料一维粘塑性本构关系[J].华南理工大学学报,2004,32(4):87-90.
Hu Ling-ling, Huang Xiao-qing, Zhang Hong, et al. One dimension viscoplasticity constitutive relationship of aluminum foam material[J]. South China Science and Engineering Transaction, 2004,32(4):87-90.

[17] 胡时胜,刘剑飞,王悟.硬质聚氨酯泡沫塑料本构关系的研究[J].力学学报,1998,30(2):151-156.
Hu Shi-sheng, Liu Jian-fei, Wang Wu. Study on the constitutive relationship of horniness polyurethane foam[J]. Mechanics Transaction, 1998,30(2):151-156.

Dynamic mechanical property experiment and constitutive model establishment of polyurethane foam aluminum*

Zhang Yong[1,2], Chen Li[3], Chen Rong-jun[2], Xie Wei-hong[2]

(1. *Mechanics & Architecture Engineering College, China University of Mining & Technology, Xuzhou* 221008, *Jiangsu, China*;
2. *Department of Airport Engineering, Air force Service College, Xuzhou* 221000, *Jiangsu, China*;
3. *College of Defense Engineering, PLA University of Science & Technology, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*)

Abstract: A new kind of composite energy absorption material was made by filling the holes of open-cell aluminum foam with polyurethane. Split Hopkinson pressure bar impact experiments were performed to evaluate the dynamic mechanical property of the polyurethane foam aluminum complex material. Based on the test results, we analyzed the mechanical behaviors of the material through influencing factors including relative density, strain, strain rate and content of polyurethane. Then the dynamic constitutive model was established. It was shown that: the dynamic modulus of elasticity of the composite material is independent of the relative density; the yield strength and the flow stress of the composite material varies directly with the strain rate and the relative density; the yield strength of the composite material varies directly with the mass of the polyurethane foam. It was proved that in definite ranges of relative density and strain rate, the curves of constitutive model fit well with the curves of experimental data. So the dynamic constitutive model has some reference value to engineering applications.

Key words: solid mechanics; dynamic constitutive model; SHPB experiment; polyurethane foam aluminum; impact load

---

* Received 13 November 2012; Revised 27 April 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (51378016)
Corresponding author: Zhang Yong, freebirdzy1980@163.com

(责任编辑 曾月蓉)