

低密度聚氨酯泡沫压缩行为实验研究^{*}

林玉亮, 卢芳云, 王晓燕, 赵习金

(国防科技大学理学院技术物理研究所, 湖南长沙 410073)

摘要:在室温下,对一种低密度硬质聚氨酯泡沫进行了准静态压缩及应变率在 $1 \times 10^3 \sim 5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 范围内的冲击压缩实验。结果表明,所测试的聚氨酯泡沫材料在准静态实验与动态实验之间存在明显的应变率效应,但在纯动态实验中应变率效应不明显。最后,给出了以屈服应力、密度、应变等为参量的动态压缩本构关系,且能较好地与材料的动态压缩曲线吻合。

关键词:分离式霍普金森压杆;本构关系;聚氨酯泡沫;高应变率

中图分类号: O347.1; O345

文献标识码: A

1 引言

硬质聚氨酯泡沫塑料(RPUF)是一种密度小、具有很好缓冲吸能特性的多孔介质,已广泛用于易损物品的包装、重要设备的防护及作为结构内部的填充物等。上述使用条件均有可能受到各种载荷(包括冲击载荷)的作用,因此,研究聚氨酯泡沫塑料在不同载荷条件下的本构响应,给出包含应变率在内的本构关系,是相关设计部门十分关注的问题。至今,国内外很多学者^[1-5]已对聚氨酯泡沫做了大量的研究。

由于泡沫材料不同于金属材料,其波阻抗特别低,若直接利用传统的分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)测试其动态力学行为,存在透射信号太弱和加载初期试件受力变形不均匀两方面的问题。为了解决透射信号弱的问题,本工作利用石英压电晶体技术^[6]测试泡沫材料的弱透射信号。关于加载初期试件受力变形不均匀的问题,则采用入射波整形技术^[7-8]对入射波进行合理设计,延长其上升前沿,实现常应变率加载,使得试件可以较好地达到受力变形均匀的状态。

2 实验结果

实验所用硬质聚氨酯泡沫材料由江苏(南京)化工研究所提供,属闭孔型泡沫材料。对其中四种密度的泡沫进行了动静态压缩实验,密度分别为 0.0778、0.171、0.280、0.480 g/cm³。准静态压缩实验利用青山 WDW-100B 微机控制万能试验机完成,试件尺寸为 $\varnothing 14 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ 。加载速率分别为 2 mm/min、20 mm/min 及 200 mm/min,相应得到的试件应变率为 2.38×10^{-3} 、 2.38×10^{-2} 和 $2.38 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。SHPB 冲击压缩实验利用本实验室自制的压杆装置进行。

通过 SEM 分析可以知道,密度为 0.0778、0.171、0.280 g/cm³ 的三种泡沫材料胞孔直径分别为 280、200、120 μm ,而一般认为,要反映材料的真实性质,需要试件的尺寸比胞孔尺寸大一个量级以上。考虑此因素及杆径对波传播的影响,本实验选用直径为 20 mm 的实验杆,试件的尺寸选为直径 14 mm,厚度分别为 2、4、6 mm 三种。选用小厚度的试件,一方面有利于试件在加载过程中受力变形均匀,另一方面也有助于完整测到泡沫材料变形的弹性区、屈服(平台)区和密实区三个阶段(实验所用子弹长度为 500 mm);采用其它两个尺寸的试件主要用于验证采用小厚度试件得到数据的合理性。

^{*} 收稿日期: 2004-11-30; 修回日期: 2005-01-27

基金项目: NSAF 联合基金项目(10276038); 国家自然科学基金项目(10172092)

作者简介: 林玉亮(1978—),男,博士研究生,主要研究方向为材料力学性能测试。E-mail: ansen_liang@163.com

图1中列出了厚度尺寸为2 mm与4 mm的四种密度聚氨酯泡沫试件的应力-应变曲线,加载应变率均控制在 3000 s^{-1} 左右。从图中可以看到,厚度对实验应力-应变曲线的影响很小,因此,为了得到更高的加载应变率、更完整的应力-应变曲线,以及使试件在加载过程中受力变形过程最大限度地接近均匀状态,在下面的实验中均选用2 mm厚试件。

图2给出的是密度为0.0778、0.171、0.280及0.480 g/cm^3 四种聚氨酯泡沫准静态和动态压缩实验的应力-应变曲线。其中,数据点对应实验数据,曲线为实验数据点六次多项式拟合曲线。

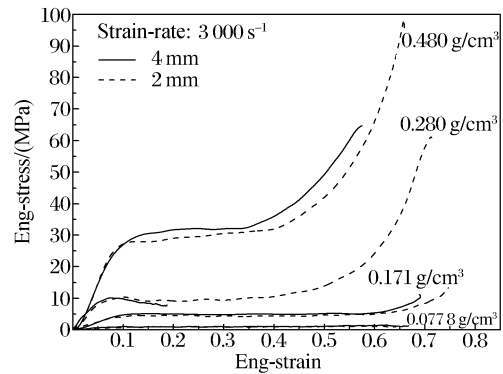


图1 不同厚度(2 mm、4 mm)试件应力-应变曲线
Fig. 1 Dynamic compression stress-strain curve of two kinds of thickness(2 mm and 4 mm)

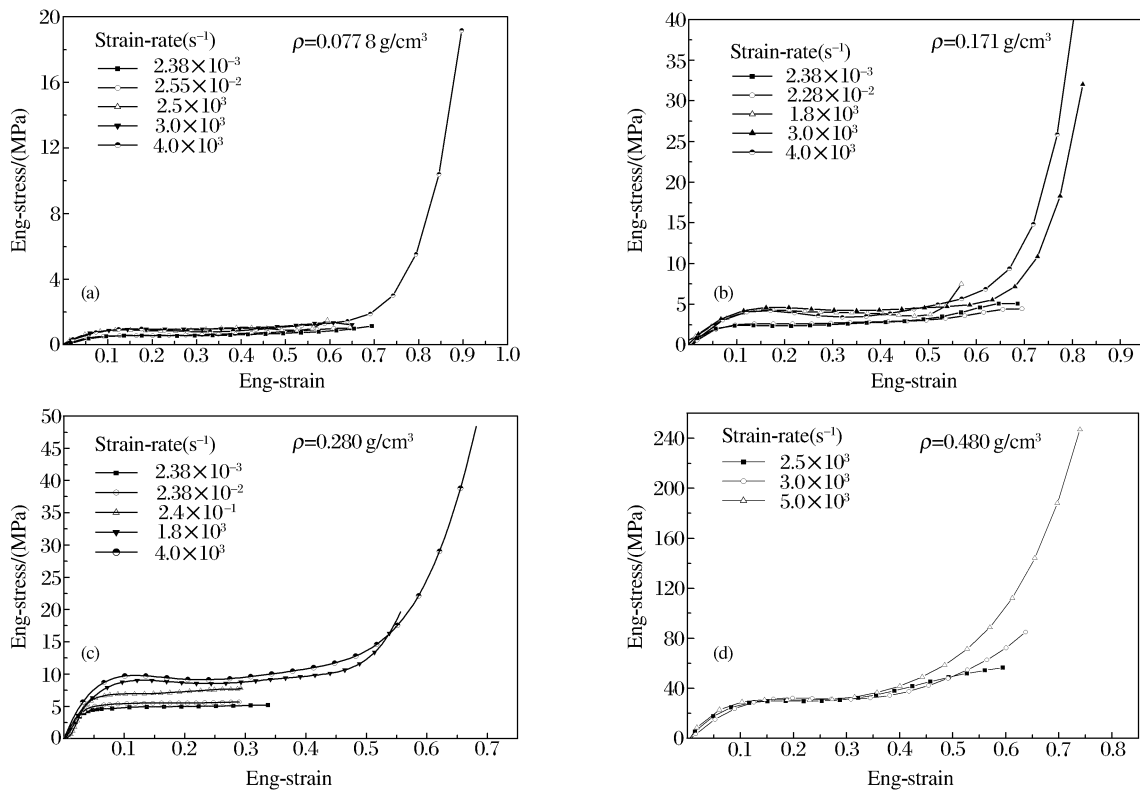


图2 四种密度聚氨酯泡沫准静态及动态加载条件下的应力-应变曲线
Fig. 2 Quasi-static and dynamic compression stress-strain curves of polyurethane foams

对上述实验结果作出总结和分析如下:

(1) 在准静态实验条件下,密度为0.28 g/cm^3 聚酯泡沫材料表现出明显的应变率效应,而密度为0.171 g/cm^3 及0.0778 g/cm^3 材料的本构响应则没有明显的应变率相关性。

(2) SHPB实验的高应变率下材料本构的应变率效应不明显,材料密实后稍微体现出应变率效应。从准静态应变率到动态高应变率,材料性质表现出强的应变率效应,屈服强度相差近一倍。

(3) 动、静态实验条件下材料本构曲线表现出相似的性态。当应变足够大时,应力-应变曲线可以分为三个阶段:(一)弹性段;(二)“平台”阶段;(三)“硬化”密实段。这三个阶段可能反映了压缩过程中泡沫体的细观变形行为。在加载初始阶段,泡孔的变形是弹性或近弹性的;随着载荷的增加,泡孔的变形趋于非弹性变形,变形逐渐加大,材料开始产生破坏,泡孔的空间将逐渐被破碎的泡壁基体填充。

如果材料处于在前两个阶段变形时停止加载,可见试件的变形有明显回弹。随着泡孔的不断破坏和破裂泡壁间相互作用所致的进一步碎化,泡孔的空间被逐渐填实,泡沫体趋向于密实体。而且,随着密度的提高,屈服平台逐步变窄。

3 本构行为分析

通过对实验结果的分析发现,本工作所测试的聚氨酯泡沫在冲击加载条件下应变率效应很小,而准静态实验条件下某些材料则表现出一定的应变率效应。因此我们认为,应该将两种加载条件下材料的响应过程分开考虑。另外,由于已有许多文献^[2,9-10]报道过准静态条件下聚氨酯泡沫类材料的本构方程,本文中将根据文献^[9]给出的本构形式,主要对冲击加载条件下材料的本构形式进行讨论。

W. Chen 等^[10]指出,硬质聚氨酯泡沫的材料屈服强度与密度之间成平方指数关系,并给出了关系式 $\sigma_y = 13.5(\rho/299)^2$, ρ 为泡沫材料的密度,单位为 kg/m^3 。通过对实验结果的分析发现,对于本工作所测试的硬质聚氨酯泡沫材料,动态屈服应力 σ_y 与密度 ρ 之间的关系可以用(1)式描述

$$\sigma_y = \sigma_0 (\rho/\rho_0)^A \quad (1)$$

式中: σ_0 与 ρ_0 为材料常数。由于低密度泡沫更能完整展现聚氨酯泡沫变形的三个阶段,这里取其实验结果作为基准,即 σ_0 与 ρ_0 分别取为 0.96 MPa 、 $0.0778 \text{ g}/\text{cm}^3$;指数 A 的值为 1.89 。表 1 中给出了实验得到的动态屈服强度与利用上式得到的计算值的比较,从中可以发现,指数 1.89 可以较好地反映密度对动态屈服强度的影响。

表 1 动态屈服强度的实验值与计算值

Table 1 The experimental data and calculated results of the dynamic yield stress

σ_y	Density			
	$0.0778 \text{ g}/\text{cm}^3$	$0.171 \text{ g}/\text{cm}^3$	$0.280 \text{ g}/\text{cm}^3$	$0.480 \text{ g}/\text{cm}^3$
$\sigma_{y,\text{Exp}}/(\text{MPa})$	0.96 ± 0.03	4.37 ± 0.3	9.87 ± 0.8	30.46 ± 0.7
$\sigma_{y,\text{Calc}}/(\text{MPa})$	0.96	4.25	10.80	29.91

另外,通过对实验后的试件观察测量可以发现,试件面积在加载过程中变化很小,可以假设试件面积在压缩过程中没有发生变化,只是厚度随着应变的增加而减少,密度相应增加,两者之间存在关系

$$\rho \approx \rho_{\text{or}}/(1 - \epsilon) \quad (2)$$

式中: ρ_{or} 为材料初始密度。同时,从应力-应变曲线中可以发现,屈服(平台)段的应力随着应变的增加缓慢增加,且密度越高增加越明显。为了表现这一趋势,同时考虑应变及密度因素,拟采用(3)式来描述这一影响

$$G(\epsilon, \rho) = \frac{\epsilon}{1 - \epsilon - B(\rho/\rho_0 - 1)} \quad (3)$$

式中: B 为常数, ρ 为材料密度, ρ_0 为最低密度聚氨酯泡沫材料的密度,即 $0.0778 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

同时,由于聚氨酯泡沫应力-应变曲线可以明显地分为三个阶段:弹性段、屈服(平台)段、密实段。结合数学函数对应的曲线形式,决定选取如下形式的形状函数来对其曲线全程进行拟合

$$f(\epsilon) = \sum_{i=1}^2 A_i [\ln(\epsilon + \epsilon_0)]^i + \sum_{i=1}^2 B_i (\epsilon)^i \quad (4)$$

其中,前两项关于 $\ln \epsilon$ 的二次项式主要用于描述应力-应变曲线的弹性段和屈服段前一部分;后两项关于 ϵ 的二次项式则用于反映屈服段后一部分及密实段。需要注意的是,由于当 ϵ 趋于零时, $\ln \epsilon$ 趋于负无穷大,因此需要添加参数 ϵ_0 来解决这一问题,一般可取 $\epsilon_0 = 0.001$ 。同时,对于泡沫这类可产生较大压缩应变的材料,取 $\epsilon_0 = 0.001$ 完全不会影响应力-应变曲线形状的计算。

综合上述因素,提出如下形式的本构方程

$$\sigma = \sigma_0 (\rho/\rho_0)^A \cdot \frac{\epsilon}{1 - \epsilon - B(\rho/\rho_0 - 1)} \left\{ \sum_{i=1}^2 A_i [\ln(\epsilon + \epsilon_0)]^i + \sum_{i=1}^2 B_i (\epsilon)^i \right\} \quad (5)$$

式中: σ_0 与 ρ_0 的意义及取值同(1)式;通过遗传算法对各曲线进行拟合得到相应的参数值,具体数值为 $A=1.89, B=0.018, A_1=1.55, A_2=0.175, B_1=-0.24, B_2=2.04$ 。

图3中给出了利用(5)式计算得到的应力-应变曲线与实验结果的比较。从图中可以看到,本文中提出的本构方程能较好地描述聚氨酯泡沫的动态压缩曲线,尤其是对于密度较低的泡沫的压缩应力-应变曲线吻合较理想。但通过该本构方程得到的材料密实后的本构曲线与实验曲线间存在一定的差异,这主要是由于材料密实后应力增长很快,(3)式由于参数比较少(而且值比较小)很难完全跟踪材料密实后的应力-应变曲线。另外,随着密度的提高,计算曲线与实验曲线出现一定的差距,这可能是由于随着密度的提高,材料的动态破坏模式发生了转变,关于这一问题我们将做进一步的分析讨论。

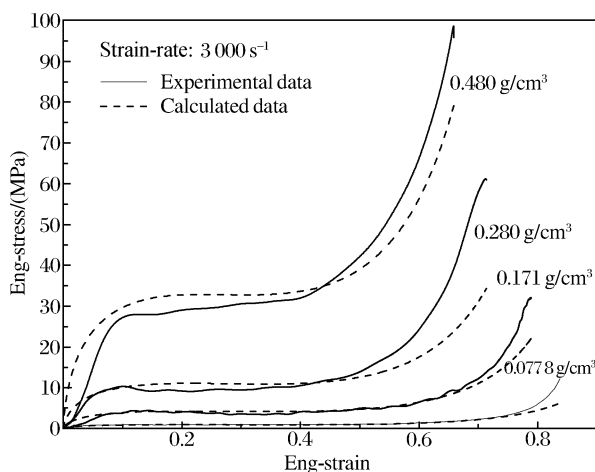


图3 实验与计算应力-应变曲线对比

Fig. 3 Comparisons between the experimental and the calculated results

4 结 论

对四种不同密度的硬质聚氨酯泡沫塑料分别进行了准静态及冲击压缩实验,结果表明:

(1) 高应变率下材料的动态压缩本构应变率效应不明显,直到本构曲线的“硬化”密实段,应变率效应才开始有所体现。

(2) 密度较高的聚氨酯泡沫材料在准静态实验加载时,应力-应变曲线表现出明显的应变率效应;低密度的则基本与应变率无关。

(3) 从准静态压缩加载到冲击压缩加载,材料性质表现出强应变率效应,屈服强度相差约一倍。

通过对冲击加载实验结果的分析,考虑密度、应变及其耦合因素对应力-应变曲线的影响,最终提出(5)式所示的本构方程。计算结果与实验结果的比较表明,该本构方程可以较好地描述本文研究的硬质聚氨酯泡沫塑料的动态压缩本构曲线。

References:

- [1] Goods S H, Neuschwanger C L, Henderson C C, et al. Mechanical Properties of CRETE, a Polyurethane Foam [J]. J Appl Poly Sci, 1998, 68: 1045-1055.
- [2] Jun Zh, Noboru K, Victor Li. Constitutive Modeling of Polymeric Foam Material Subjected to Dynamic Crush Loading [J]. Inter J Impact Eng, 1998, 21(5): 369-386.
- [3] Hu Sh Sh, Liu J F, Wang W. Study on the Constitutive Relationship of Rigid Polyurethane Foam [J]. Acta Mechanica Sinica, 1998, 30(2): 151-156. (in Chinese)
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.
- [4] Lu Z X, Zhu W M, Kou C H, et al. Investigation on the Fracture Properties of Polyurethane Rigid Foam Plastics [J]. Acta Mechanica Sinica, 2002, 32(5): 627-631. (in Chinese)
卢子兴, 朱汪鲲, 寇长河, 等. 聚氨酯泡沫塑料的强度与断裂韧性 [J]. 力学学报, 2002, 32(5): 627-631.
- [5] Lu Z X, Xie R Z, Tian C J. Investigation into Shear Mechanical Properties of PUR Foamed Plastics [J]. J Beijing Univer Aero Astro, 1999, 25(5): 561-564. (in Chinese)
卢子兴, 谢若泽, 田常津. 聚氨酯泡沫塑料剪切力学性能的研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(5): 561-564

- [6] Chen W, Lu F, Zhou B. A Quartz-Crystal-Embedded Split Hopkinson Pressure Bar for Soft Materials [J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40(1): 1-56.
- [7] Nemat-Nasser S, Isaacs J B, Starrett J E. Hopkinson Techniques for Dynamic Recovery Experiments [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1991, 435(A): 371-391.
- [8] Frew D J, Forrestal M J, Chen W. Pulsing Shaping Techniques for Testing Brittle Materials with a Split Hopkinson Pressure Bar [J]. *Experimental Mechanics*, 2002, 42(1): 93-106.
- [9] Sherwood J A, Forst C C. Constitutive Modeling and Simulation of Energy Absorbing Polyurethane Foam [J]. *Poly Eng Sci*, 1992, 32(16): 1138-1146.
- [10] Chen W, Lu F, Winfree N. High-Strain-Rate Compression Behavior of a Rigid Polyurethane Foam with Various Densities [J]. *Exp Mech*, 2002, 42(1): 65-73.

Experimental Study of the Compressible Behavior of Low-Density Polyurethane Foam

LIN Yu-Liang, LU Fang-Yun, WANG Xiao-Yan, ZHAO Xi-Jin

*(Department of Applied Physics, National University of
Defense Technology, Changsha 410073, China)*

Abstract: The compressive stress-strain behaviors of polyurethane foams in four different mass densities have been tested by SHPB at strain rates of $1 \times 10^3 \sim 5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$. Experimental results show that the compressive behavior of the polyurethane foam is sensitive to the strain rates between quasi-static experiments and SHPB experiments. However, the behavior is not sensitive to the strain-rate under condition of dynamic compression. A experiential constitutive relation, which considers density effect of the foams on materials features at high strain-rates, has been proposed based on Sherwood model. The relation is well agreed to the experimental data.

Key words: Split Hopkinson Pressure Bar; constitutive relation; polyurethane foam; high strain rate