

硬质聚氨酯泡沫塑料动态力学性能的研究

胡时胜^a 刘剑飞^a 冯建平^b

(a. 中国科学技术大学力学和机械工程系 合肥 230026)

(b. 中国科学技术大学结构分析研究开放实验室 合肥 230026)

摘要 介绍了用分离式 Hopkinson 压杆对硬质聚氨酯泡沫塑料(RPUF)进行的一种高应变率实验,第一次完整地给出了 RPUF 在 10^3s^{-1} 高应变率下的动态应力应变曲线,并对 RPUF 的动态力学性能及其吸能缓冲机理作了简单的分析。

关键词 泡沫塑料 动态力学性能 分离式 Hopkinson 压杆

中图法分类号 O344.1

1 前言

泡沫塑料是一种比重小、价格低、成型容易的多孔介质。它具有很好的吸收动能的特性,能够缓和冲击、减弱振荡、降低应力幅值,因此已广泛用于易损物品的包装、重要设备的防护及结构物内部的填充等。由于以上这些使用条件均有可能经受冲击载荷,因此研究泡沫塑料在各种冲击载荷下的力学行为是有关设计部门十分关注的问题。

泡沫塑料多指聚氨酯类泡沫塑料,也有聚苯乙烯泡沫塑料及硅橡胶泡沫的,有硬质、半硬质和软质的。较系统研究这类材料并提出本构关系的有美国学者 Rusch^[1~2],但是他提出的方程仅适用于准静态过程。Meinecke 等^[3]、Nagy 等^[4]考虑了应变率影响,对 Rusch 的模型作了修改,认为初始模量与应变率有关。Sherwood 等^[5]则将环境温度和密度也考虑进去,提出了更为全面的本构关系。所有确定这些模型的冲击试验大多是在冲击摆或落锤装置上进行的,也有在中应变率试验机上进行的。然而,由于波动效应的影响,前者的试验方法有效性值得怀疑,后者的应变率只能限制在 10^2s^{-1} 以下。

Green 等^[6]曾在分离式 Hopkinson 压杆上做过硬质聚氨酯泡沫塑料(RPUF)的冲击试验。然而试验是不成功的,未能给出相应的应力应变曲线。在试验工作中,他们遇到的第一个困难是 RPUF 试件变形初期的应力不均匀性破坏了均匀假定的条件。由于 RPUF 的波速很低(约 500m/s),因此应力波在试件(长为 12.5mm)中往返一次的时间长达 $50\mu\text{s}$ 。而在这段时间内,一个典型的冲击载荷($v_0 \approx 10\text{m/s}$)可使 RPUF 试件产生 $3\% \sim 5\%$ 的变形。也就是说,试件尚处于应力不均匀状态时,其变形已高达 $3\% \sim 5\%$,因此常规的 Hopkinson 压杆计算公式已不能使用。他们遇到的第二个困难是 RPUF 试件在变形过程中的破碎及飞散妨碍了应力应变曲线的确定。

国内也有这方面的工作,卢子兴等^[7]讨论了 RPUF 压缩力学性能,但仅限于准静态的;吴用舒等^[8]曾在普通的疲劳试验机上实施 RPUF 的冲击压缩试验,然而其实验的有

效性及数据的准确性尚需讨论。

鉴于国内外现有的研究状态,进一步讨论加载速率更高时的应力应变关系,提出包括 10^3s^{-1} 高应变率下的低压本构关系是十分必要的。

我们在前人工作的基础上,利用自制的大尺寸分离式 Hopkinson 压杆妥善地解决了试件变形初期的应力不均匀性及透射波信号太小等问题,获得了满意的结果,给出了高应变率(10^3s^{-1})下的应力应变曲线,为进一步的研究工作奠定了基础。

2 实验方案

冲击实验在自制的大尺寸(直径为 37mm)分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)上进行。鉴于泡沫体的泡孔尺寸较大(几百微米),因此采用泡孔尺寸两个量级的大尺寸试件是十分必要的。据此所得结果可代表真实材料的宏观特性。试件材料为中国船舶科学研究所中心提供的 RPUF,密度为 0.211g/cm^3 ,直径为 33mm 。

为了能有效捕捉信号,实验采用电阻应变片和半导体应变片相结合的方法,即输入杆上贴用电阻应变片,而输出杆上贴用半导体应变片。由于 RPUF 是一种低强度材料,较小的应力脉冲就可以使试件产生明显的变形,又由于 RPUF 是一种超低声抗材料,波阻抗仅为压杆材料(超硬铝)的 1% ,因此透过试件并进入输出杆的应力脉冲则更小。若仍采用电阻应变片测量,外界干扰信号(如电台信号)的幅值可与它所测得的信号处于同一量级,从而严重影响着实验的测量精度。在输出杆上贴用半导体应变片,由于半导体应变片灵敏度系数为 100 ,是电阻应变片的 50 倍左右,因此由它所测的信号的信噪比也扩大了 50 倍左右,从而可获得真实准确的透射信号^[9]。

对于 Green 等提出的试件变形初期的应力不均匀性的影响,周风华等^[10]曾经作过专门的讨论,并提出了消除这种应力不均匀性影响的修正方法。据此,我们对常规的数据处理程序作了修改,并实测了修正方法中所需的 RPUF 试件的弹性波速(585m/s)。

冲击试验的应变率大致控制在 $500, 1000, 2000\text{s}^{-1}$ 。为了能实测到 RPUF 这类多孔介质的变形全过程(弹性区、屈服区和致密区),我们采取了提高弹速、加长子弹以及减小试件厚度等办法。为了能与准静态应力应变曲线比较,我们还在岛津(日本制)万能试验机上做了静压试验。

3 结果与分析

记录的原始波形如图 1、图 2 所示,处理后的典型结果如图 3 所示。

结果表明 RPUF 的动态屈服应力大于其准静态下的结果,表现出应变率敏感性。另外, RPUF 的动态应力应变曲线与准静态应力应变曲线之间还有一个明显的不同之处是,前者的曲线存在着一个尖峰,而后者没有。这里的尖峰反映了泡孔结构的屈曲具有明显的应变率敏感性,而在准静态试验中则不存在这一问题,尽管在图上也呈现出轻微的下降。

结果还表明,尽管动态曲线和静态曲线在幅值上有差异(即存在着应变率效应),但它们的变形趋势是一致的。它们都经历了多孔介质固有的变形三阶段,其中:弹性区主要反映了 RPUF 泡孔结构的强度特性,屈服区主要反映了 RPUF 泡孔结构被压垮、屈曲的过程,而致密区则反映了 RPUF 基体粉末的压实过程。这三个阶段的转折应变也是一致的,

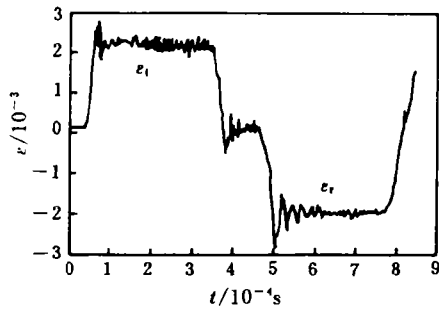


图 1 用电阻应变片记录的人射波和反射波
Fig. 1 The incident strain pulse and reflection strain pulse recorded by resistance gauge

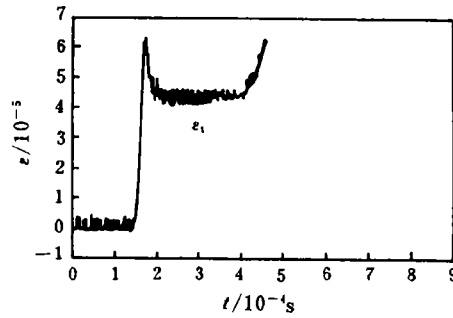


图 2 用半导体应变片记录的透射波
Fig. 2 The transmission strain pulse recorded by semiconductor gauge

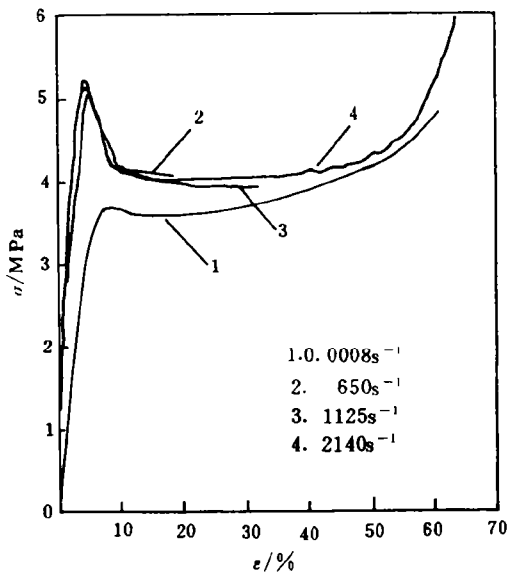


图 3 应力应变曲线
Fig. 3 The strain-stress curve



图 4 泡沫的吸能缓冲机理
Fig. 4 The mechanism of energy-absorption and cushioning action
即材料的屈服点以及粉末压实起始点仅仅与 RPUF 的密度有关,而与应变率无关。

RPUF 的上述变形特性很好地说明它的吸能缓冲机理。由图 4 可知,泡沫塑料的吸能缓冲作用主要取决于面积 A 的大小,因此屈服应力 σ_y 和屈服

区宽度 $(\epsilon_0 - \epsilon_y)$ 是决定吸能缓冲强弱两个主要因素。泡沫塑料在它被压实之前不可能传递超过其屈服应力 σ_y 的应力,应变率敏感性有利于吸能缓冲。屈服区宽度主要取决于泡沫塑料的泡孔被全部压垮时的应变 ϵ_0 , ϵ_0 是与泡沫塑料密度 ρ 有关的量。 ρ 越小则 ϵ_0 越大,因而它的屈服区也愈宽,多孔性也有利于吸能缓冲。泡沫塑料是一种很好的吸能材料。但是, ρ 的减小将使泡沫材料屈服应力 σ_y 的幅值下降,而 σ_y 又是一个应变率有关的量。因此,根据大量实验数据,提出泡沫塑料的本构关系 $\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, \rho)$, 这对工程实际应用是十分必要的。

试验结果证实,实验方案中提出的几条措施都是行之有效的。另外,从实测到的波形

中看不出 RPUF 试件在高速变形过程中有碎块飞出。事实上,Green 等提供的高速摄影照片已证实了这一点。从前面的应力应变曲线中也可以看到这一点,其尖峰处仅反映了泡孔被迅速压垮,之后则一直处于平滑阶段,不存在由于碎块飞出而造成的突然下降。

4 结 论

(1)采取一些有效措施,可以利用分离式 Hopkinson 压杆,对 RPUF 材料进行冲击试验,并测出这种材料在 10^3s^{-1} 高应变率下的动态应力应变曲线。

(2)泡孔结构屈曲具有明显的应变率敏感性。

(3)泡沫塑料所独有的很低屈服强度及很宽屈服区的变形特性,使它具有良好的吸能缓冲特性,合理选择这类材料的密度及泡孔结构可获得吸能缓冲的最佳效果。

参 考 文 献

- 1 Rusch C H. J Appl Polym Sci, 1969, 13: 1433
- 2 Rusch C H. Load-Compression Behavior of Brittle Foams. J Appl Polym Sci, 1970, 14: 1263
- 3 Meinecke E A. Energy Absorption in Polymeric foams. J Appl Polym Sci, 1970, 14: 2239
- 4 Nagy A, Ko W L, Lindholm U S. J Cell Plastics, 1974, 10: 127
- 5 Sherwood J A, Frost C C. Constitutive Modeling and Simulation of Energy Absorbing Polyurethane Foam Under Impact Loading. Polym Eng Sci, 1992, 32: 1138
- 6 Green S J, Schierloh F L, Perkins R D et al. High-Velocity Deformation Properties of Polyurethane Foams. Exp Mech, 1969, 9: 103
- 7 卢子兴,田常津,谢若泽. 硬质聚氨酯泡沫塑料压缩力学性能. 材料研究学报, 1994, 8(4): 452
- 8 吴用舒,曹锡江,严忠汉,等. 硬聚氨酯泡沫塑料动态压缩特性的一次试验测量. 振动与冲击, 1986, 5(1): 65
- 9 胡时胜,唐志平,王礼立. 应变片技术在动态力学测量中的应用. 实验力学, 1987, 2(1): 73
- 10 周凤华,王礼立,胡时胜. 高聚物 SHPB 试验中试件早期应力不均匀性的影响. 实验力学, 1992, 7(1): 23

STUDY OF THE DYNAMIC MECHANICAL BEHAVIOUR OF RIGID POLYURETHANE FOAM

Hu Shisheng, Liu Jianfei, Feng Jianping

(University of Science and Technology of China, Hefei, 230026)

ABSTRACT In this paper, the experimental results of rigid polyurethane foam (RPUF) under high strain-rate by Split Hopkinson Pressure Bar are presented. The dynamic stress-strain curves of RPUF at about 10^3s^{-1} strain rate have been given for the first time, and the dynamic mechanical behaviour as well as the mechanism of energy absorption and cushioning action are analyzed briefly.

KEY WORD foam plastic, dynamic mechanical behaviour, SHPB