

聚氨酯泡沫塑料在应力波加载下的 压缩力学性能研究^{*}

卢子兴^a 田常津^b 韩铭宝^a 谢若泽^b 王仁^a

(a. 北京大学力学系 北京 100871)

(b. 中国工程物理研究院结构力学所 成都 610003)

摘要 通过 SHPB 冲击实验装置研究了硬质聚氨酯泡沫塑料在应力波加载下的动态力学性能,得到了泡沫塑料在较高应变率下的应力-应变曲线;确定了泡沫塑料的动态屈服强度和动态弹性模量等力学参数,并同落锤冲击实验及准静态压缩实验的结果进行了比较。

关键词 泡沫塑料 应力波 力学性能

中图分类号 O347.4

1 引言

聚氨酯泡沫塑料是现代工程中广泛使用的材料。由于聚合物泡沫塑料的力学性能通常是率相关的,因此设计者不仅要了解材料的静态力学性能,还要了解材料的动态力学性能,特别是较高应变率下泡沫塑料的力学性能更具有重要意义^[1]。以往泡沫塑料力学性能的研究多数局限于准静态或低速冲击加载的情况^[2],并且由于应用范围所限和便于理论处理,很多文献只讨论低密度泡沫塑料的力学行为^[3]。Green^[4]等最早(1969年)用实验方法研究了聚氨酯泡沫塑料的高速变形力学性质,但没能从实验得到材料在高应变率变形下的应力-应变曲线。他们在特定的 SHPB 装置和所用的试件下,估算应力波在试件中往返一次约 50 μs ,所以认为用 SHPB 方法计算材料应力-应变关系时,均匀化条件不成立;此外还认为,初始应力波可能已使试件破坏,其后的所谓“准静态”加载是在一个退化的试件上进行的。根据实验观察,我们认为他们的观点对较低密度泡沫塑料的实验来说是正确的,但随着泡沫塑料密度的增加情况会有所不同。关于这一点,Hinckley^[1]等利用短子弹直接冲击泡沫试件及其后长杆的实验是一个很好的证明。Hinckley 等给出的结论是:当泡沫塑料密度为 0.2 g/cm³左右时,其局部的损伤已不会明显影响整体材料的力学性能。因此对 SHPB 冲击实验来说,关键是要求均匀化条件能成立^[5]。在我们的实验中所用泡沫塑料的密度是 0.3 g/cm³和 0.5 g/cm³两种密度,并且采用的试件长度是 1 cm,这样按照 0.3 g/cm³密度泡沫塑料的静态杨氏模量估计的弹性波速约为 840 m/s,可知,应力波传过试件一次只需 12 μs ,而试件在弹性波作用下的响应是 126 μs ;根据文献[6]的研究,波在试

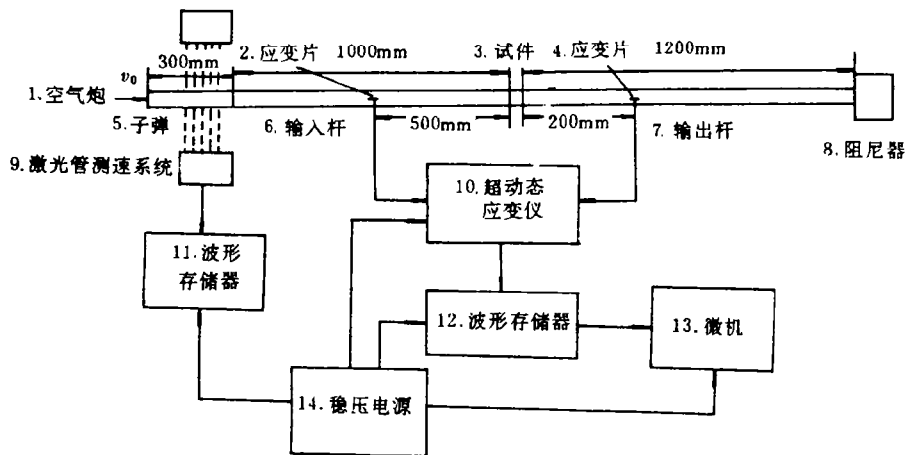
国家自然科学基金资助项目,中国工程物理研究院科研基金资助项目。

1994年7月21日收到初稿,1995年3月7日收到修改稿。

件中往返 3~5 次可认为均匀化了。显然,对于 0.5 g/cm^3 密度的泡沫塑料试件,波的往返时间会更短,效果也更好一些。因此,我们基于均匀化假设研究了上述两种密度泡沫塑料在应力波加载下的材料应力-应变关系,得到了较高应变率下泡沫塑料的动态力学性能。

2 实验描述及测量原理

聚氨酯泡沫塑料的高速冲击实验在 SHPB 冲击装置上进行,实验装置及测量系统如图 1 所示。一般的 SHPB 实验装置均采用相同的测量原理,即不测量试件的应力和应变而直接测量输入杆和输出杆上适当位置的应变,就可以得到试件的平均应变、应变率及应力,从而得到试件材料的应力-应变曲线^[5]。应变测量位置示于图 1,应变信号由应变片(灵敏系数为 2.16;阻值为 120.5Ω)、K-54 超动态应变仪和 TEK-2430 存储示波器测量及记录;子弹速度由激光管测速仪以及存储示波器测量和记录。应变片串联后对称贴于杆的两侧以便消除弯曲对测量的影响。应变测量采用通常的方法进行,由标定信号的应变来确定实际信号的大小,并且根据应力波理论进行校核^[7]。实验所用材料为硬质聚氨酯泡沫塑料,试件沿发泡方向取料加工。为满足均匀化条件,应选择较薄的试件;但要大于胞体平均尺寸一至二个量级,这样的试件才能代表真实材料的宏观力学性质^[4]。本实验研究所用试件尺寸为:直径 25 mm;长度 10mm。基本符合 Lindholm^[8]给出的尺寸条件,可忽略惯性力对测量的影响。输入杆和输出杆的直径为 25 mm,长度尺寸见图 1。而压杆的材料参数为:密度 8.01 g/cm^3 ,弹性模量 184 GPa,由此确定杆中波速为 4780 m/s。实验时,为了减小端面摩擦的影响在试件端面上涂上少许黄油。



1. Gas gun; 2. Strain gauge; 3. Sample; 4. Strain gauge; 5. Bullet; 6. Input bar; 7. Output bar; 8. Damper;
9. Laser velocity measurement system; 10. Super-dynamical strain gauge;
11, 12. Wave from memory; 13. Micro-computer; 14. Voltage stabilizer

图 1 SHPB 实验装置及测量系统简图

Fig. 1 The schematic diagram of SHPB experimental set and measurement system

利用存储示波器记录的输入、输出杆上的应变波形,采用一维应力波理论,把波形输入微机进行处理,就可以得到一维压缩应力-应变曲线。数据处理原理如下

$$\sigma_s(t) = EA[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)]/2A_s \quad (1)$$

$$\varepsilon_s(t) = (c/L_s) \int_0^t [\varepsilon_i(t') - \varepsilon_R(t') - \varepsilon_T(t')] dt' \quad (2)$$

$$(d\varepsilon_s/dt) = (c/L_s)[\varepsilon_i(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] \quad (3)$$

其中: E 、 A 和 c 分别为输入杆、输出杆的弹性模量、截面积和波速; A_s 和 L_s 是试件的原始截面积和长度; ε_i 、 ε_R 和 ε_T 分别为输入杆和输出杆的应变片在实验时得到的入射波、反射波和透射波的应变值。 σ_s 、 ε_s 、 $d\varepsilon_s/dt$ 分别为试件中的应力、应变和应变率。假设应力波在试件中达到了均匀化, 则有

$$\varepsilon_i + \varepsilon_R = \varepsilon_T \quad (4)$$

将(4)式代入(1)、(2)和(3)式并考虑到已知条件, 即杆的面积 A 与试件初始面积 A_s 相同, 最后近似得到

$$\sigma_s(t) = E\varepsilon_T(t) \quad (5)$$

$$\varepsilon_s(t) = (2c/L_s) \int_0^t [\varepsilon_i(t') - \varepsilon_T(t')] dt' \quad (6)$$

$$(d\varepsilon_s/dt) = (2c/L_s)[\varepsilon_i(t) - \varepsilon_T(t)] \quad (7)$$

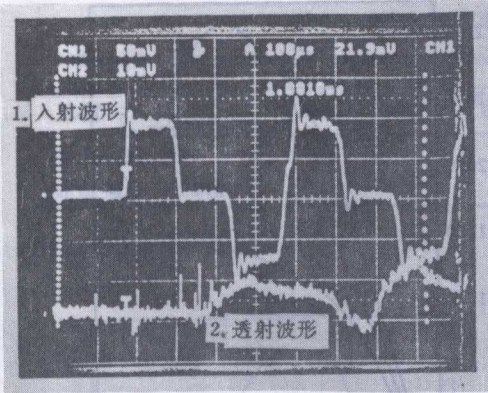
由测得的 $\varepsilon_i(t)$ 和 $\varepsilon_T(t)$, 通过计算可以得到 $\sigma_s(t)$ 、 $\varepsilon_s(t)$ 和 $d\varepsilon_s/dt$, 然后消去时间参数便得到某一应变率下泡沫塑料试件的平均应力-应变曲线。

3 实验结果和结果的分析

聚氨酯泡沫塑料在 SHPB 冲击实验中经历的应变率为 $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$; 冲击时, 输入杆、输出杆上的典型应力波形如图 2 所示。由图 2 给出的典型波形可见, 入射脉冲长度为 $126 \mu\text{s}$, 透射波形长度远远超过这一长度, 同时可见, 透射波的强度幅值较入射波小许多(比值一般为百分之十左右或更小)。所以, 泡沫塑料在应力波加载的条件下具有很好的缓冲效果, 应力波的强度通过试件后会产生较大的衰减, 并且泡沫塑料的密度越小, 这种效果越明显。应力波通过泡沫塑料后, 透射波的长度较入射波长度长出许多的现象称为应力波的弥散^[7]。通过上述透射波长度与入射波长度的比较, 说明应力波通过泡沫塑料后产生较强的应力波弥散。根据实验记录, 应力波在泡沫塑料中的弥散程度与泡沫塑料的密度有关。我们认为, 泡沫塑料产生的应力波弥散除了与这种材料特殊的微观结构有关外, 主要由泡沫塑料在高应变率下的基体粘性效应和胞体塌陷所导致的粘性弥散及能量耗散决定的。令人遗憾的是, 我们实验研究中使用的 Hopkinson 压杆太短(输出杆), 无法测出完整的透射应力波的波形。按照实验记录的透射波波形和应力波在输出杆中传播的分析, 透射波的长度一般大于 $418 \mu\text{s}$ 。关于透射波波长的准确结果还需实验进一步确定。

图 3 给出了应力波加载时的应变率时程曲线, 由图可见在相当长的时间内应变率基本保持为常值。因此, 在应力波加载下, 泡沫塑料的高速变形可看作是常应变率的。实验证明, 这一结论对于其它密度和速度的情况也是成立的。

图 4~图 7 分别给出了两种密度的增强和普通(未加玻璃纤维)泡沫塑料在高应变率加载下的应力-应变曲线和相应的较低应变率的材料应力-应变曲线。由图 4~图 7 可见, 几种材料应力-应变曲线的共同特点是, 随应变率的提高, 泡沫塑料的弹性模量和屈服强度均有不同程度的提高。泡沫塑料的强度提高较为明显, 除 W-0.3 材料外, 泡沫塑料弹性



1. Incident wave; 2. Transmitted wave

图2 应力波加载实验中的典型应力波形 (W-0.5 泡沫塑料)

Fig. 2 The typical signal of stress wave in the experiment

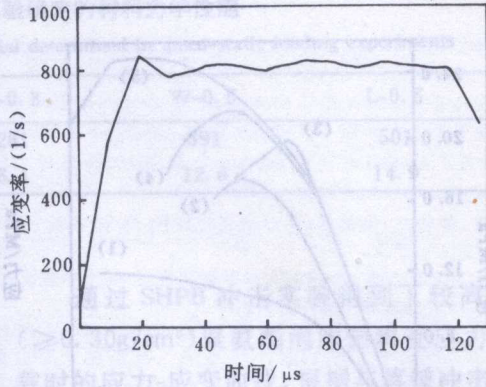
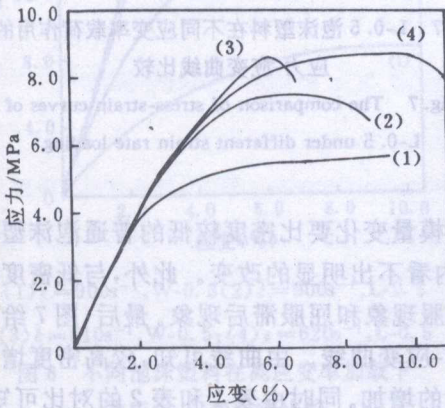


图3 应力波加载实验中的典型应变率时程曲线 (W-0.5 泡沫塑料)

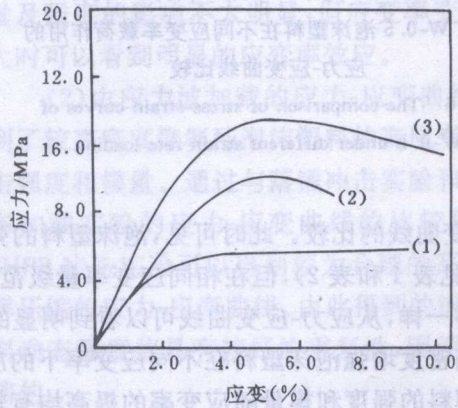
Fig. 3 The relation between strain rate and time in the experiment of wave loading



(1) $\dot{\epsilon} = 3.3 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$; (2) $\dot{\epsilon} = 85 \text{s}^{-1}$; (3) $\dot{\epsilon} = 530 \text{s}^{-1}$; (4) $\dot{\epsilon} = 900 \text{s}^{-1}$

图4 W-0.3 泡沫塑料在不同应变率载荷作用的应力-应变曲线比较

Fig. 4 The comparison of stress-strain curves of W-0.3 under different strain rate loading

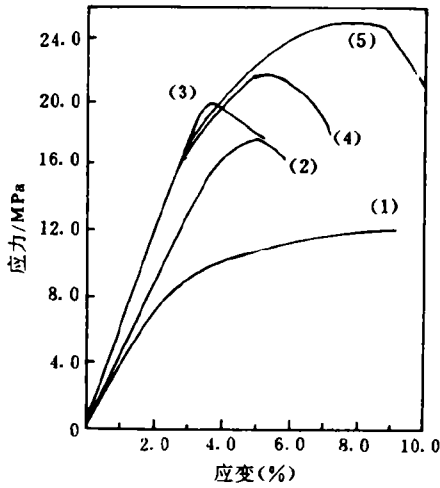


(1) $\dot{\epsilon} = 3.3 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$; (2) $\dot{\epsilon} = 85 \text{s}^{-1}$; (3) $\dot{\epsilon} = 900 \text{s}^{-1}$

图5 L-0.3 泡沫塑料在不同应变率载荷作用的应力-应变曲线比较

Fig. 5 The comparison of stress-strain curves of L-0.3 under different strain rate loading

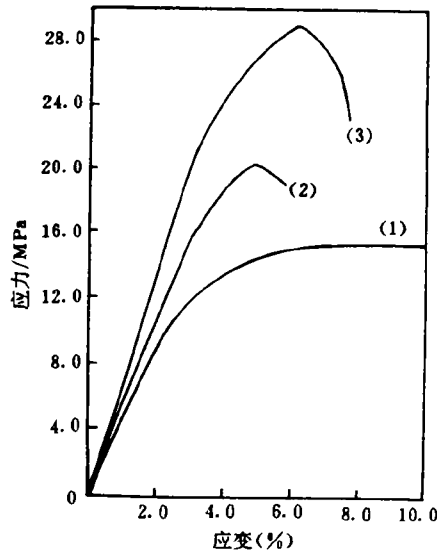
模量的提高也较为明显(见表1和表2)。其中,图4给出了W-0.3泡沫塑料在不同应变率载荷作用下应力-应变曲线的比较。可以看到,在动态加载条件下都有明显的屈服现象,但在高应变率的应力波加载下,应力-应变曲线没有落锤冲击实验中的应力波动^[9];还可以看到,随应变率的提高,比例极限应力范围明显增大。此外,泡沫塑料的模量变化很小,请参阅表1和表2。图5给出了较低密度增强泡沫塑料在不同应变率下的应力-应变曲线。通过比较可见曲线特点与相应的普通泡沫塑料基本相同,只是材料的强度及模量随应变率的变化高于相应的普通泡沫塑料。图6为较高密度的普通泡沫塑料在不同应变率下的应



(1) $\dot{\epsilon} = 3.3 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$; (2) $\dot{\epsilon} = 85 \text{s}^{-1}$;
 (3) $\dot{\epsilon} = 430 \text{s}^{-1}$; (4) $\dot{\epsilon} = 580 \text{s}^{-1}$; (5) $\dot{\epsilon} = 810 \text{s}^{-1}$

图 6 W-0.5 泡沫塑料在不同应变率载荷作用的应力-应变曲线比较

Fig. 6 The comparison of stress-strain curves of W-0.5 under different strain rate loading



(1) $\dot{\epsilon} = 3.3 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$; (2) $\dot{\epsilon} = 85 \text{s}^{-1}$;
 (3) $\dot{\epsilon} = 620 \text{s}^{-1}$;

图 7 L-0.5 泡沫塑料在不同应变率载荷作用的应力-应变曲线比较

Fig. 7 The comparison of stress-strain curves of L-0.5 under different strain rate loading

力-应变曲线的比较。此时可见,泡沫塑料的弹性模量变化要比密度较低的普通泡沫塑料明显(见表 1 和表 2),但在相同应变率量级范围内看不出明显的改变。此外,与低密度泡沫塑料一样,从应力-应变曲线可以看到明显的屈服现象和屈服滞后现象。最后,图 7 给出了较高密度增强泡沫塑料在不同应变率下的应力-应变曲线。由曲线可知,较高密度增强泡沫塑料的强度和模量随应变率的提高均有较大的增加。同时由表 1 和表 2 的对比可知,增强泡沫塑料的应变率敏感性并不比普通泡沫塑料高出许多。除 W-0.3 泡沫塑料强度增加较小外,其它几种材料的强度(从准静态到高应变率加载)几乎都增加了一倍。所以,较低密度的普通泡沫塑料更适合于在高应变率加载时作缓冲或吸能方面的材料。

表 1 应力波加载下泡沫塑料动态材料性能

Table 1 The dynamic mechanical properties of PUR foam plastics under stress wave loading

材 料	子弹速度/(m/s)	应变率/(1/s)	杨氏模量/MPa	屈服强度 MPa
W-0.3	10.6	900	200	8.7
L-0.3	10.6	900	460	13.5
W-0.5	10.4	810	610	25.2
L-0.5	8.3	620	667	29.1

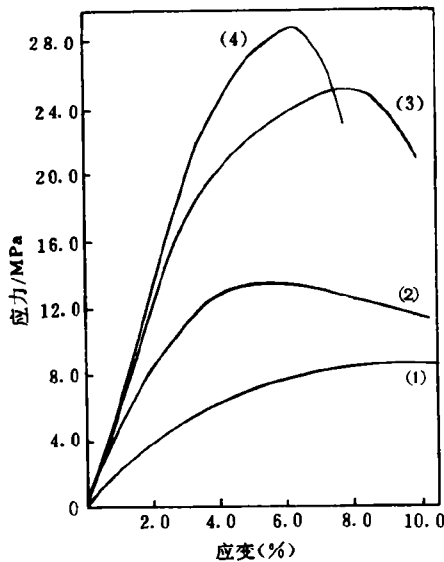
注:这里给出的弹性模量只作为参考值;W 和 L 分别表示无填料的普通泡沫塑料及玻璃纤维增强的泡沫塑料,其后的数值表示材料密度。

表2 准静态加载实验确定的材料力学性能

Table 2 The mechanical properties of material determined in quasi-static loading experiments

材 料	W-0.3	L-0.3	W-0.5	L-0.5
弹性模量/MPa	193	261	391	501
屈服强度/MPa	5.8	6.1	12.6	14.9

4 讨论和结论



(1) $\dot{\epsilon} = 900\text{s}^{-1}$, W-0.3 (2) $\dot{\epsilon} = 900\text{s}^{-1}$, L-0.3
(3) $\dot{\epsilon} = 810\text{s}^{-1}$, W-0.5; (4) $\dot{\epsilon} = 620\text{s}^{-1}$, L-0.5

图8 不同泡沫塑料在高应变率加载下的应力-应变曲线比较

Fig. 8 The comparison of stress-strain curves for different foam plastics under higher strain rate loading

通过 SHPB 冲击实验得到了较高密度 ($\geq 0.30\text{g/cm}^3$) 聚氨酯泡沫塑料受应力波加载时的应力-应变曲线。根据与落锤冲击实验和准静态加载得到的应力-应变曲线的对比可以得到如下结论:

(1) 聚氨酯硬质泡沫塑料是应变率敏感的, 并且这种敏感性随密度的提高而有所增加。在较小的应变率范围内, 应变率对材料模量及强度的影响不太明显, 但应变率变化较大时可以看到明显的应变率效应。

(2) 由应力波加载的应力-应变曲线, 得到了较高密度聚氨酯泡沫塑料的高应变率冲击强度和模量。通过与落锤冲击实验和准静态加载实验的应力-应变曲线的比较可知: SHPB 冲击实验可以得到较为合理的高应变率压缩的应力-应变曲线。由此得到的泡沫塑料动态强度值具有较好的重复性, 因而是可信的。

(3) 在动态加载条件下, 泡沫塑料的应力-应变曲线均有明显的屈服现象。增强泡沫塑料在较高应变率载荷作用下的增强效果与低应变率时不同, 高应变率加载往往使泡沫塑料

出现脆化, 同时也会改变材料变形和失效的模式^[9]。

(4) 图8给出几种泡沫塑料在高应变率加载下的应力-应变曲线比较。可见, 不同密度及不同类型的泡沫塑料之间力学性能存在很大差异。虽然几种材料的强度及模量大小的次序与准静态加载时相同, 但它们之间的相对大小却发生了变化。较低密度的增强泡沫塑料与相应的普通泡沫塑料力学相比, 其强度和模量的差异随应变率的增加均有较大的变化。而较高密度泡沫塑料性能之间的差异随应变率的变化不如低密度材料明显。

致谢: 中国工程物理研究院化工材料研究所李怀祥主任为本实验提供了材料; 中国工程物理研究院结构力学研究所何鹏工程师为实验的实施提供了帮助。

参 考 文 献

- 1 Hinckley W M, Yang J C S. Analysis of Rigid Polyurethane Foam as a Shock Mitigator. *Exp Mech*, 1975, 15, 177~183.
- 2 Meinecke E A, Clark R C. *Mechanical Properties of Polymeric Foams*. Conn: Technomic, Westport, 1973.
- 3 Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solid: Structure & Properties*. [s. l.]Pergamon Press, 1988.
- 4 Green S J, Sohierioh F L, Perkins R D, Babcock S G. High-Velocity Deformation Properties of Polyurethane Foams. *Exp Mech*, 1969, 9, 103~109.
- 5 韩铭宝, 陈晓红, 张国华. 几种金属材料拉-卸-拉动态力学性能的研究, 第七届全国实验力学学术会议论文集, 1992, 1221~1224.
- 6 李 铭. 多功能拉压 SHPB 装置的研制及应用, 硕士学位论文. 北京大学, 1989.
- 7 王礼立. 应力波基础. 北京: 北京大学, 1989.
- 8 Lindholm U S. Some Experiments with the Split Hopkinson Pressure Bar. *J Mech Phys Solids*, 1964, 12, 317~335.
- 9 卢子兴, 田常津, 韩铭宝, 王 仁. 聚氨酯泡沫塑料冲击力学性能的实验研究. *高分子材料科学与工程* (已录用).

**INVESTIGATION OF THE MECHANICAL
PROPERTIES OF COMPRESSION ON
POLYURETHANE RIGID(PUR) FOAM
PLASTICS UNDER STRESS WAVE LOADING**

Lu Zixiang^a, Tian Changjin^b, Han Mingbao^a, Xie Ruoze^b, Wang Ren^{a)}

(a. *Dept. of Mechanics, Peking University Beijing, 100871*)

(b. *Southwest Institute of Structural Mechanics, Chengdu, 610003*)

ABSTRACT The dynamic mechanical properties of PUR foam plastics under stress wave loading have been investigated by SHPB experimental set. The stress-strain curves of PUR foam plastics are obtained at higher strain rate. The dynamic yield strength and moduli are also determined. At the same time, the experimental results are compared with the ones of Drop Testing and quasi-static compression experiment.

KEY WORDS PUR foam plastics, stress wave, mechanical properties.