

# 聚碳酸酯压缩力学性能实验研究

穆磊金<sup>1</sup>, 胡文军<sup>2</sup>, 陶俊林<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621000)

**摘要:**聚碳酸酯(PC)是一类玻璃态非晶聚合物材料,由于其出色的耐热和抗冲击性能,被广泛应用于国防军事和工业领域。为获得聚碳酸酯的压缩力学性能,采用MTS810材料实验机和分离式Hopkinson压杆实验装置,对聚碳酸酯进行了准静态压缩试验和动态压缩试验,获得了聚碳酸酯在 $10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内应力应变曲线,分析应变率对聚碳酸酯屈服应力的影响规律。结果表明:聚碳酸酯在压缩时,随着应变率的增大屈服应力逐渐增大,在不同应变率范围内,屈服应力与对数应变率关系可以用二次函数和线性关系描述;与静态压缩相比,动态压缩软化效应减弱,而被随后而至的强化效应所取代,表明高应变率下应变软化和应变硬化存在竞争趋势。

**关键词:**分离式霍普金森压杆;力学性能;准静态压缩;动态压缩;聚碳酸酯

**中图分类号:**O341;TB301

**文献标志码:**A

## 引言

聚碳酸酯(PC)具有轻质、高强度、抗损伤等优良的力学性能,尤其是耐冲击性优异,因此它们被广泛地应用于建材行业、医疗器械、电子电器、汽车制造业、航空航天等领域。在这些应用中,聚碳酸酯广泛应用于经受高速冲击荷载环境中,故对其动态力学性能有较高的要求。现有对聚碳酸酯力学性能的研究主要有:孙朝翔等<sup>[1]</sup>利用分离式霍普金森压杆技术对PC进行高应变率动态压缩力学实验;Christmann A等<sup>[2]</sup>进行了聚碳酸酯大应变下的单轴拉伸实验研究;Perez J M等<sup>[3]</sup>对温度加速PC材料老化行为进行了研究;马新忠等<sup>[4]</sup>进行了聚碳酸酯拉伸力学性能的应变率相关性实验;付顺强等<sup>[5]</sup>开展了聚碳酸酯的高应变率拉伸实验;曹侃等<sup>[6-7]</sup>进行了低温下聚碳酸酯冲击拉伸性能实验研究和在不同应

变率下聚碳酸酯的拉伸力学性能研究;蒋晶等<sup>[8]</sup>研究了注射压缩成型聚碳酸酯的低温拉伸力学性能;于鹏等<sup>[9-10]</sup>研究了聚碳酸酯类非晶聚合物力学性能及其本构关系;胡文军等<sup>[11-13]</sup>进行了聚碳酸酯冲击压缩实验研究与聚碳酸酯弹丸穿甲实验研究,并且研究了聚碳酸酯的动态应力应变响应以及屈服行为。由此可见,上述对聚碳酸酯力学性能研究的应变率范围相对较窄,因此进行PC材料的在宽应变率范围内的力学性能研究是很有必要的。

本研究采用MTS810材料实验机和分离式霍普金森压杆(SHPB)对PC试样在 $10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的压缩性能进行了实验研究。

## 1 实验部分

### 1.1 试样制备

压缩实验所用试样由PC棒料经机械加工而成,准

收稿日期:2017-02-17

基金项目:国家自然科学基金(11272300)

作者简介:穆磊金(1990-),男,陕西咸阳市人,硕士生,主要从事高分子材料的力学性能方面的研究,(E-mail)leijinmu@163.com;

胡文军(1966-),男,重庆人,研究员,博士,主要从事材料力学行为方面的研究,(E-mail)wjhu@vip.sina.com

静态压缩实验的试样尺寸为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 动态压缩实验的试样尺寸为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 实验前所有试样在测试环境温度下进行状态调节 48 h。

### 1.2 实验设备

准静态压缩实验在 MTS810 材料试验机上进行, 动态压缩实验采用 SHPB 装置, 子弹长 300 mm, 入射杆、透射杆长均为 1260 mm, 如图 1 所示。SHPB 实验得到的 PC 试样入射杆和透射杆上应变片记录的典型信号如图 2 所示。

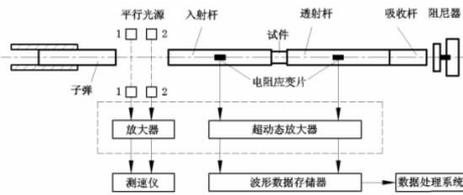


图1 SHPB装置简图

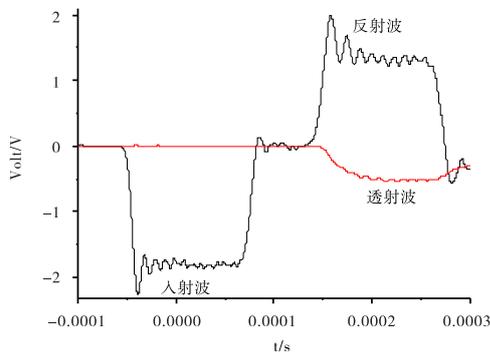


图2 波导杆上应变片记录的典型信号

### 1.3 实验原理

SHPB 实验系统在进行材料动态力学性能实验时, 要求波导杆在实验过程中始终保持弹性, 系统的主要假设是一维应力假设, 即试样与波导杆中应力是一维的, 只存在轴向应力, 这使应力波在波导杆中的传播满足一维弹性应力波理论。

根据安装在波导杆上的应变片记录的应变脉冲信号, 由二波公式(1)~(3)计算出试样上的应变、应变率和应力<sup>[14-15]</sup>。

$$\varepsilon = \frac{2C_0}{L_0} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r) d\tau = -\frac{2C_0}{L_0} \int_0^t \varepsilon_r d\tau \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{C_0}{L_0} (\dot{\varepsilon}_i - \dot{\varepsilon}_r - \dot{\varepsilon}_i) = -\frac{2C_0}{L_0} \dot{\varepsilon}_r \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{EA}{2As} (\varepsilon_i + \varepsilon_r) = \frac{EA}{As} \varepsilon_i \quad (3)$$

其中:  $C_0$  为波导杆的弹性纵波波速;  $E$  是波导杆的弹性模量;  $L$  是波导杆的横截面积;  $L_0$  试样的长度;  $As$  为试件的横截面积;  $\varepsilon_i$ 、 $\varepsilon_r$  和  $\varepsilon_i$  分别表示波导杆记录到的入

射脉冲、反射脉冲和透射脉冲。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PC 材料的压缩性能

对准静态压缩实验的数据进行处理, 获得 PC 的准静态压缩应力应变曲线如图 3 所示。

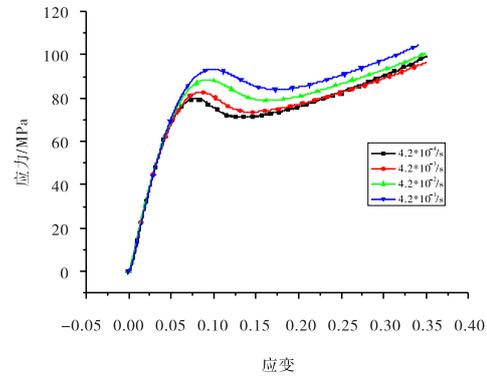


图3 PC材料准静态压缩应力应变曲线

根据波导杆上的记录信号, 利用二波公式计算得到的 PC 应力应变曲线如图 4 所示。

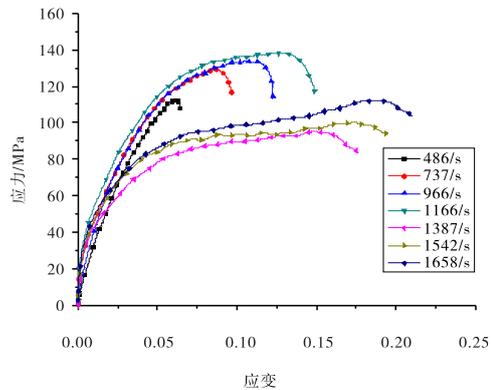


图4 PC材料动态压缩应力应变曲线

由图 3 可知, 在低应变率下 PC 材料的应力应变曲线有相似的形状, 但是随着应变率的增加, 屈服应力逐渐增大; 由图 4 可知, 与静态压缩相比, 动态压缩软化效应减弱, 而被随后而至的强化效应所取代, 表明高应变率下应变软化和应变硬化存在竞争趋势。应变率增加导致流动应力增大。动态压缩曲线明显地分成了两组, 当应变率高于  $1387 \text{ s}^{-1}$  时, PC 材料的屈服应力反而比应变率低于  $1166 \text{ s}^{-1}$  的屈服应力小。这主要是由于随着应变率的增加, 材料变形由等热变形转变为绝热变形, 导致温度要升高; 另一方面, 随着温度的升高, 又会导致材料流变应力的下降, 所以, 应变率对流变应力的影响在材料中和温度是竞争关系, 必然存在一个临界点。

## 2.2 PC材料应变率敏感性分析

为了研究PC材料的应变率敏感性,现将应变率为 $10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 与 $10^2 \text{ s}^{-1} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 下PC材料的屈服应力值列于表1,并将此表的数据按应变率的对数作为横坐标,屈服应力作为纵坐标绘成图5所示曲线。

表1 不同应变率下PC的屈服应力

$\dot{\varepsilon}$	$4.2 \times 10^{-4}$	$4.2 \times 10^{-3}$	$4.2 \times 10^{-2}$	$4.2 \times 10^{-1}$
$\lg \dot{\varepsilon}$	-3.08	-2.08	-1.08	-0.08
$\sigma_s / \text{MPa}$	79.86	82.82	88.40	93.20
$\dot{\varepsilon}$	486	737	966	1166
$\lg \dot{\varepsilon}$	2.69	2.87	2.98	3.07
$\sigma_s / \text{MPa}$	113.29	116.15	117.06	120.15
$\dot{\varepsilon}$	1387	1542	1658	
$\lg \dot{\varepsilon}$	3.14	3.19	3.22	
$\sigma_s / \text{MPa}$	80.80	83.87	87.68	

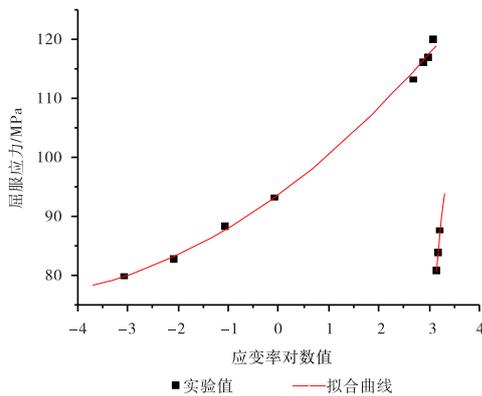


图5 PC材料屈服应力与对数应变率的关系

由表1可知,随着加载应变率的提高,PC材料的屈服应力值逐渐增大,表现对应变率的敏感性。为了在较宽应变率范围内获得PC屈服应力与应变率的关系,通过对实验结果的分析 and 归纳最后可得出表达式(4)和(5)。

$$\sigma_s = 0.57(\lg \dot{\varepsilon})^2 + 6.25 \lg \dot{\varepsilon} + 93.75 \quad (4)$$

$$(10^{-4} \text{ s}^{-1} < \dot{\varepsilon} < 1166 \text{ s}^{-1})$$

$$\sigma_s = 83.49 \lg \dot{\varepsilon} - 181.66 \quad (5)$$

$$(\dot{\varepsilon} > 1387 \text{ s}^{-1})$$

式(4)和式(5)能够预测PC材料应变率范围在 $10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 范围内的屈服应力与应变率的关系。

## 3 结论

(1) 通过对实验结果分析可以得出,PC材料存在明显的应变率效应,即随着加载应变率的提高,应力值逐渐增大。

(2) PC材料动态压缩的应力应变关系与准静态实验有所差异,主要表现在应变软化现象变弱。在研究应

变率效应时发现,PC在动态压缩时,随着应变率的增大导致温度升高,而温度的升高又会引起流变应力下降,所以,应变率对流变应力的影响在材料中和温度是竞争关系,必然存在一个临界点。

## 参考文献:

- [1] 孙朝翔,鞠玉涛,胡少青,等.聚碳酸酯高应变率分离式霍普金森压杆实验研究[J].南京理工大学学报:自然科学版,2012,36(3):529-533.
- [2] CHRISTMANN A, JENNY P, QUANTIN J C, et al. Mechanical behavior at large strain of polycarbonate nanocomposites during uniaxial tensile test[J]. Polymer, 2011, 52(18): 4033-4044.
- [3] PEREZ J M, VILAS J L, LAZA J M, et al. Effect of reprocessing and accelerated ageing on thermal and mechanical polycarbonate properties [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(5): 727-733.
- [4] 马新忠,汪洋,王宇.聚碳酸酯拉伸力学性能的应变率相关性实验[J].高分子材料科学与工程,2009,25(9):131-134.
- [5] 付顺强,汪洋,王宇.聚碳酸酯的高应变率拉伸实验[J].实验力学,2009,24(3):202-206.
- [6] 曹侃,汪洋,王宇.低温下聚碳酸酯冲击拉伸性能的实验研究[J].兵工学报,2010(S1):195-198.
- [7] CAO K, MA X, ZHANG B, et al. Tensile behavior of polycarbonate over a wide range of strain rates[J]. Materials Science & Engineering A, 2010, 527(16-17): 4056-4061.
- [8] 蒋晶,王小峰,侯建华,等.注射压缩成型聚碳酸酯制品的低温拉伸力学性能[J].化工学报,2015,66(10): 4268-4274.
- [9] 于鹏,姚小虎,张晓晴,等.聚碳酸酯类非晶聚合物力学性能及其本构关系[J].力学进展,2016,46(1):140-178.
- [10] 于鹏.航空聚碳酸酯动态力学性能及本构关系研究[D].广州:华南理工大学,2014.
- [11] 胡文军,张方举,田常津,等.聚碳酸酯的动态应力应变响应和屈服行为[J].材料研究学报,2007,21(4): 439-443.
- [12] 胡文军,唐录成,张方举,等.聚碳酸酯冲击压缩的实验研究[J].高分子材料科学与工程,2006,22(6): 165-168.

- [13] 胡文军,陈成军,张方举,等.聚碳酸酯弹丸穿甲实验与数值模拟[J].爆炸与冲击,2013,33(6):574-580. (SHPB) technique[J].Nuclear Engineering and Design, 2003,226:119-125.
- [14] LEE O S,KIM M S.Dynamic material property characterization by using split Hopkinson pressure bar [15] 宋力,胡时胜.SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J].爆炸与冲击,2005,25(4):368-373.

## Research on Compression Mechanical Properties of Polycarbonate

MU Leijin<sup>1</sup>, HU Wenjun<sup>2</sup>, TAO Junlin<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Polycarbonate (PC) is a kind of glassy amorphous polymer material, which has been widely used in the field of national defense military and industrial areas because of its excellent heat resistance and impact resistance. For the compression mechanical properties of polycarbonate, MTS810 material testing machine and SHPB experiments were carried out by the apparatus of the quasi-static compression test and dynamic test of polycarbonate. The stress-strain curves of polycarbonate in the strain range of  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  to  $10^3 \text{ s}^{-1}$  were obtained, and the effect of strain rate on the yield stress was analyzed. The results show that the polycarbonate in compression, with the increase of strain rate of yield stress increasing at different strain rate range, yield stress and logarithmic strain rate can be described by quadratic function and linear relationship; compared with the static compression, dynamic compression softening effect was weakened, and the strengthening effect was followed by instead, indicating the existence of competition trend of softening and strain hardening at high strain rate and strain.

**Key words:** split Hopkinson pressure bar; mechanical property; quasi-static compression; dynamic compression; polyethylene