

聚碳酸酯中低应变率范围下动态力学性能研究

葛宇静, 白春玉, 惠旭龙, 舒挽

(中国飞机强度研究所 结构冲击动力学航空科技重点实验室, 西安 710065)

摘要: **目的** 研究聚碳酸酯材料在一定温度下中低应变率范围内的力学性能。**方法** 利用高速液压伺服材料试验机和非接触测试分析系统, 在不同温度(-45~70 °C)下对聚碳酸酯材料进行应变率范围(0.05~60 s⁻¹)的动态拉伸试验, 获得各温度不同应变率下的真实应力-真实应变曲线。**结果** 聚碳酸酯材料的屈服强度和流动应力随着应变率的增加而增加, 随着温度的增加而降低。**结论** 聚碳酸酯材料在此温度和应变率范围内具有明显的应变率强化效应和温度软化效应。

关键词: 中低应变率; 聚碳酸酯; 动态力学性能

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.09.013

中图分类号: TJ04 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)09-0066-05

Dynamic Mechanical Property of Polycarbonate under Intermediate and Low Strain Rates

GE Yu-jing, BAI Chun-yu, HUI Xu-long, SHU Wan

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structures Impact Dynamics, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: Objective To study mechanical properties of polycarbonate under intermediate and low strain rates at certain temperature. **Methods** Dynamic tensile experiments of polycarbonate under strain rates ranged from 0.05/s to 60/s were developed with high velocity hydraulic servo-testing machine and non-contact measurement system between -45 and 70 °C, and true stress-true strain curves under different strain rates and at each temperature were obtained. **Results** Yield strength and flow stress of polycarbonate increased with the increase of strain rate and decreased with the increase of temperature. **Conclusion** Polycarbonate has apparent strengthening effect of strain rate and softening effect of temperature within the temperature and strain rate range.

KEY WORDS: intermediate and low strain rates; polycarbonate; dynamic mechanical property

聚碳酸酯材料具有比强度和比刚度高、突出的透明性以及较广的温度使用范围等特点, 在航空和汽车领域内得到越来越广泛的应用。由聚碳酸酯材料制成的透明件在服役过程中可能会受到高速冲击等强动载荷的作用, 影响航空或汽车结构的安全。作为一种高聚物, 加载时间和温度对其力学性能影响较大, 表现出黏弹性和黏塑性, 材料的屈服强度和流动应力以及破坏应变等性能都可能会随着应变率和温度的变

化而显著变化。

目前, 对聚碳酸酯的力学特性研究多数体现在准静态 (<10⁻¹ s⁻¹) 和高应变率范围 (>10³ s⁻¹) 内^[1-7]。准静态试验主要是利用万能材料试验机装置, 高应变率试验主要是利用霍普金森压杆/拉杆装置。中、低应变率 (10⁻¹~10³ s⁻¹) 试验设备主要包括高速液压伺服试验机^[8]、Gleeble 热模拟试验机^[9]以及中国科学技术大学自主研制的中应变率拉压试验机^[10]。由于设备

不普及,对聚碳酸酯在此应变率范围的力学性能研究较少。然而,聚碳酸酯材料在例如鸟撞等冲击载荷下多处于中、低应变率范围下的变形,因此有必要开展聚碳酸酯材料中、低应变率力学性能研究。

文中依托高速液压伺服材料试验机对聚碳酸酯材料进行了一定温度范围内中、低应变率下的动态拉伸试验,揭示了应变率和温度对聚碳酸酯材料力学性能的影响。

1 动态拉伸试验

动态拉伸试验平台为高速液压伺服材料试验机 (INSTRON VHS 160/100-20),如图 1 所示。试验机系统由水冷机组、液压系统、机架和控制系统四部分组成,最大加载速度为 20 m/s,可承受最大冲击动载为 100 kN。试验中利用试验机自带的压电传感器测试试件的动态拉伸载荷,利用高速摄像系统结合非接触测试分析软件测试试件的动态拉伸应变。

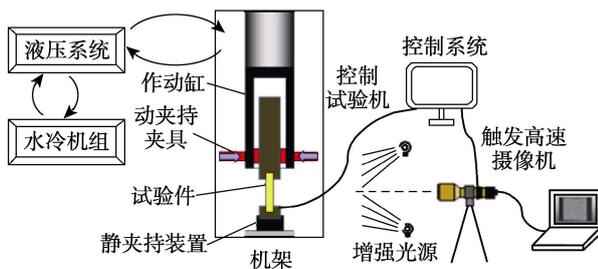


图 1 聚碳酸酯材料动态拉伸试验系统

聚碳酸酯材料的试验件为扁平状哑铃型,试验件尺寸见“GB/T 1040—92 塑料拉伸性能试验方法”中的 I 型试验件。试验中试件的安装状态如图 2 所示,夹具下部分固定在试验机上,调整夹具撑杆的长度使得试验件在有效长度内被夹持,试验中将试验件安装在夹具装置中。试验过程中,通过液压作动筒结合气体蓄能器提供加载能量,作动筒在设定位置达到预定



图 2 试件安装

的加载速度,当作动筒和夹具上部分的凸台碰触后,作动筒引导夹具上部分向上运动,从而拉伸试验件,实现恒定速率拉伸。

1.1 动态载荷测试

高速液压伺服材料试验机的动态载荷系统 (DLC, Dynamic Load Cell) 中的载荷传感器可直接测得试验件的拉伸载荷。在较高应变率下,试验机的共振效应导致测试结果发生振荡,可结合低通滤波和滑动平均方法等进行合理修正。

1.2 应变测试

采用非接触方法测量试件的应变。如图 3 所示,基于高速摄像技术的非接触测试和分析系统可用于测试高速拉伸过程中试件的工程应变。其通过在试验件标距段标注标记 (见图 4),利用高速摄像机实时采集目标区域的变形情况,结合非接触分析软件计算两个标记点的位移,进而得到试件表面的动态拉伸应变数据。根据现场光线情况调整曝光时间,高速摄像机和高速液压伺服试验机中的数据采集系统设置为同步触发。

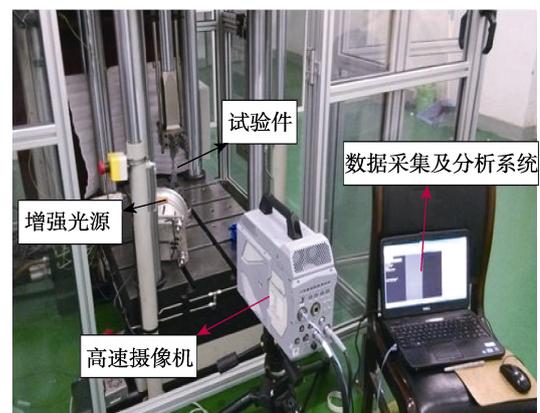


图 3 非接触分析系统



图 4 以标记点标注标距段

1.3 测试数据处理

由试验测得的载荷数据结合式 (1) 计算材料的工程应力。由工程应力和工程应变数据,结合式 (2)、式 (3) 计算真实应力和真实应变。由应变数据对时间微分计算实际应变率,见式 (4)。通过插值方法将应力和应变这两套数据的采样间隔时间一致起来,并确定应力和应变两套数据的各自起始点,获得工程应力-工程应变曲线和真实应力-真实应变曲线。

$$\sigma(t) = F(t) / (w \cdot h) \tag{1}$$

$$\sigma_T(t) = \sigma(1 + \varepsilon) \tag{2}$$

$$\varepsilon_T(t) = \ln(1 + \varepsilon) \tag{3}$$

$$\dot{\varepsilon}_T(t) = d\varepsilon_T / dt \tag{4}$$

式中： $F(t)$ 为载荷传感器测得的载荷； h 为试验段厚度； w 为试验段宽度； ε 为非接触分析系统计算得到的工程应变； $\sigma_T(t)$ 为真实应力； $\varepsilon_T(t)$ 为真实应变； $\dot{\varepsilon}_T(t)$ 为应变率。

1.4 性能测试工况

对聚碳酸酯板材试件进行-40、-25、0、25、50、70℃等6个温度的动态拉伸试验，目标应变率为0.055、0.55、5.5、55 s⁻¹，应变率取值以各工况下的实际应变率进一步确定。

2 结果分析

2.1 试件拉伸变形特征

图5中的曲线是-40℃、目标应变率为0.055 s⁻¹拉伸试验中的工程应力曲线，变形包括6个阶段，依次为：弹性变形、屈服、应变软化、冷拉、应变硬化、断裂。其中弹性变形阶段表现出非线性变形。

2.2 应变率效应和温度效应

图6a为-40℃环境温度下聚碳酸酯材料在应变率0.06、0.58、5.74、53.92 s⁻¹下的真实应力-真实应变曲线；图6b为-25℃环境温度下聚碳酸酯材料在应变率0.06、0.56、5.68、51.29 s⁻¹下的真实应力-真实应变曲线；图6c为0℃环境温度下聚碳酸酯材料在应变率0.06、0.53、5.93、52.15 s⁻¹下的真实应力-真实应变曲线；图6d为25℃环境温度下聚碳酸酯材料在应变率0.055、0.58、5.02、55.485 s⁻¹下的真实应力-真实应变曲线；图6e为50℃环境温度下聚碳酸酯材料在应变率0.053、0.53、5.8、59.35 s⁻¹下的真实应力-真实应变曲线；图6f为70℃环境温度

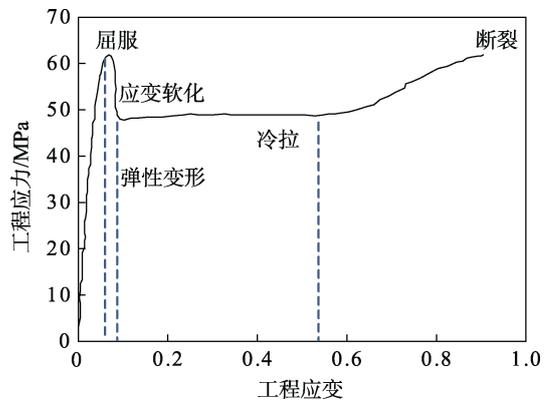
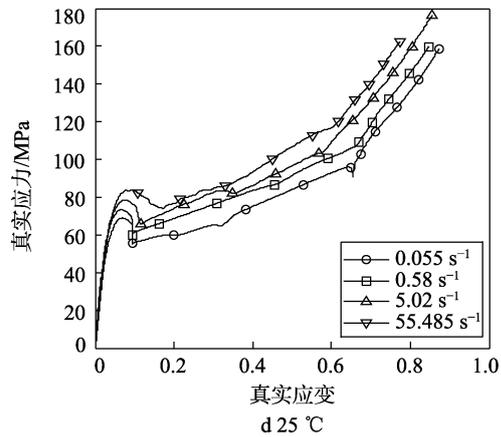
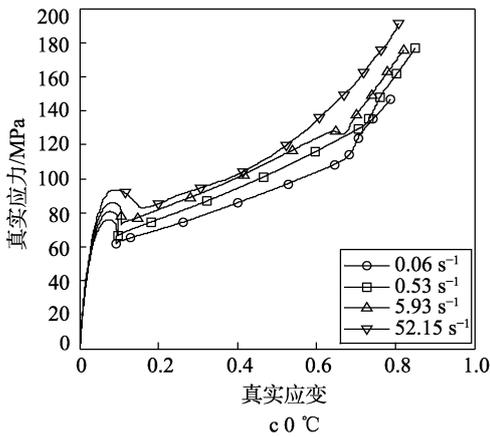
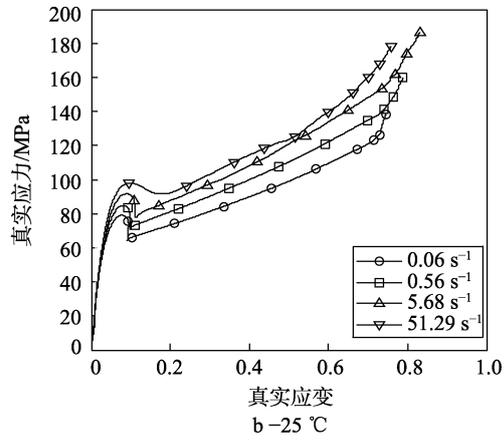
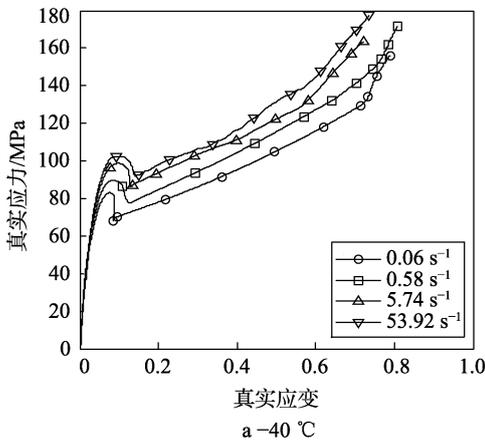


图5 拉伸变形分区



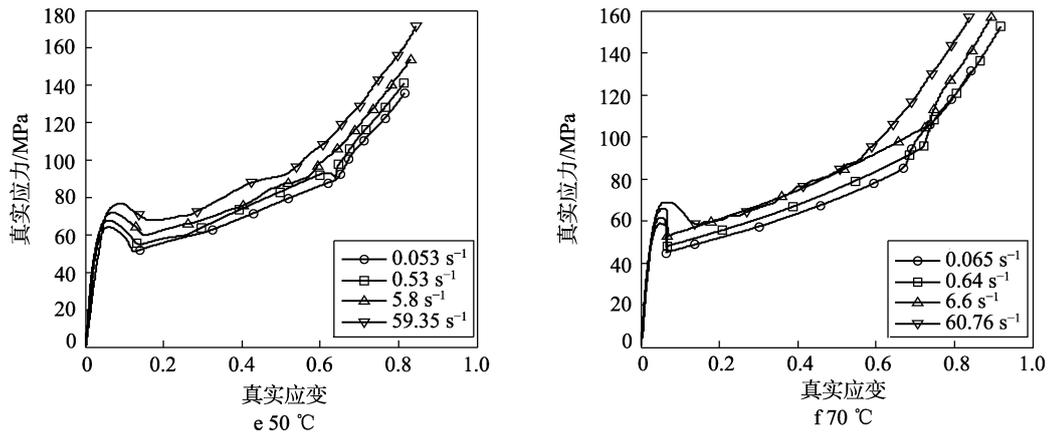


图 6 不同环境温度各应变率下的真实应力-应变曲线

下聚碳酸酯材料在应变率 0.065、0.64、6.6、60.76 s⁻¹ 下的真实应力-真实应变曲线。

汇总各环境温度同一目标应变率下聚碳酸酯的真实应力-真实应变曲线，应变率取值为各环境温度的实际应变率均值。-40、-25、0、25、50、70 °C 温度中聚碳酸酯在应变率 0.06、0.57、5.8、55.5 s⁻¹ 下的真实应力-真实应变曲线如图 7 所示。

从图 6 中可以看出，-40~70 °C 温度范围内，聚碳酸酯的屈服强度和流动应力随着应变率的增大而增大，表现出较为明显的应变率敏感性，呈现应变率

强化效应。从图 7 中可以看出，0.05~60 s⁻¹ 应变率范围内，聚碳酸酯的屈服强度和流动应力随着温度的增大而减小，表现出较为明显的温度敏感性，呈现温度软化效应。

聚碳酸酯在 70 °C、应变率 0.065 s⁻¹ 下的屈服强度为 59 MPa，而在 -40 °C、应变率 53.92 s⁻¹ 下的屈服强度为 102 MPa，屈服强度提升了约 1 倍。由此可见，构建聚碳酸酯材料的本构关系时需要考虑温度和应变率对力学性能的影响。

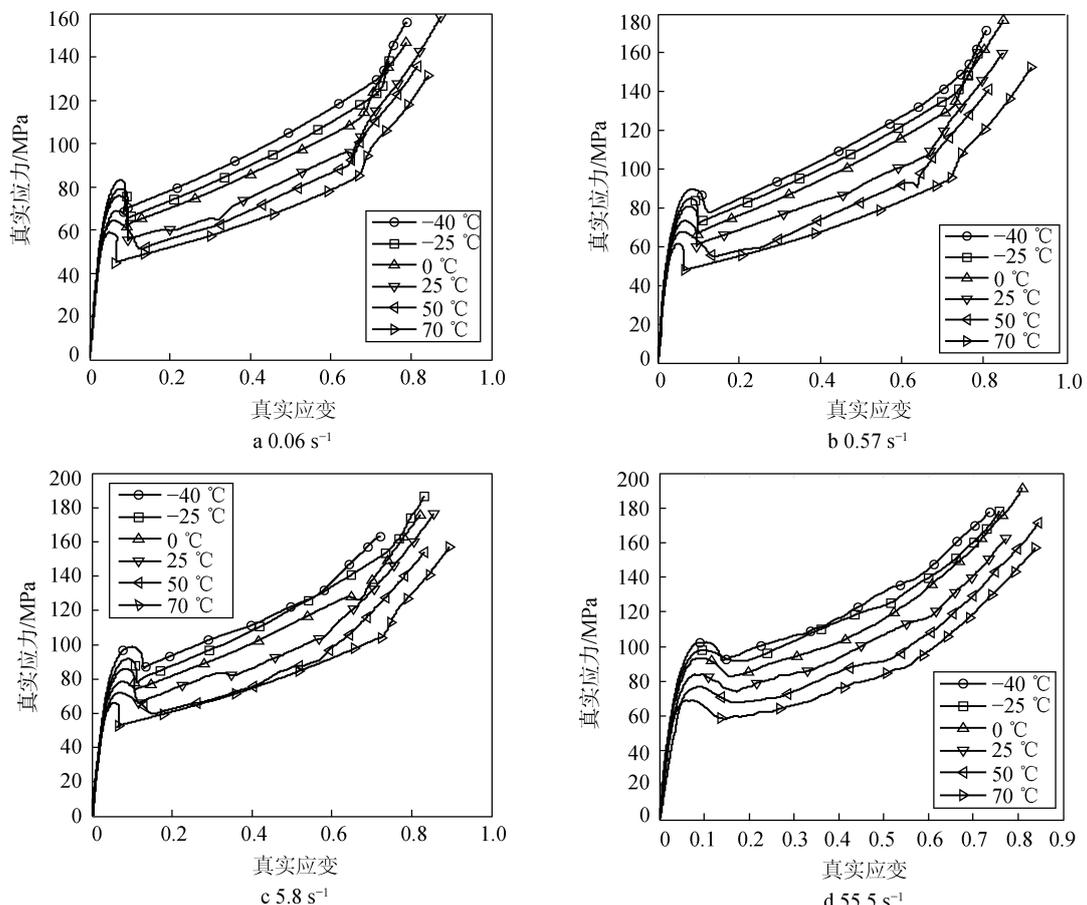


图 7 不同应变率各温度下的真实应力-应变曲线

3 结语

文中依托高速液压伺服材料试验机和非接触测试分析方法进行了-40~70 °C温度范围、0.05~60 s⁻¹应变率范围内的单向拉伸试验,获得了各温度中低应变率下的真实应力-真实应变曲线。在指定的温度和应变率范围内,最低温度、最大应变率下聚碳酸酯材料的屈服强度约为最高温度、最小应变率下屈服强度的2倍,呈现出较为明显的应变率强化效应和温度软化效应,数值模拟分析时应在聚碳酸酯材料属性模块中体现出应变率和温度效应。

参考文献:

- [1] 马新衷,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.
- [2] 曹侃. 聚碳酸酯动态拉伸力学行为的测试与表征[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [3] 冯震宙,王新军,王富生,等. 朱-王-唐非线性粘弹性本构模型在有限元分析中的实现及应用[J]. 材料科学与工程学报, 2007, 25(2): 269-272.
- [4] 付顺强. 聚碳酸酯动态拉伸力学性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [5] 穆磊金,胡文军,陶俊林. 聚碳酸酯压缩力学性能实验研究[J]. 四川理工学报, 2017, 30(2): 49-52.
- [6] 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, 2012, 36(3): 529-533.
- [7] 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.
- [8] 白春玉,刘小川,周苏枫,等. 中应变率下材料动态拉伸关键参数测试方法[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(4): 507-512.
- [9] 钱利锋,侯英玮. U75V 钢流动应力的试验研究[J]. 锻压技术, 2009, 34(5): 132-135.
- [10] 张学峰,夏源明. 中应变率材料试验机的研制[J]. 实验力学, 2001(1): 13-18.