

文章编号: 1001-4888(2013)02-0220-07

PMMA 材料的动态压缩力学特性 及应变率相关本构模型研究^{*}

谢中秋, 张蓬蓬

(中国空空导弹研究院, 河南洛阳 471009)

摘要: 利用 INSTRON 万能试验机和分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)对 PMMA 试件在较宽应变率范围内进行了单轴压缩实验,研究加载应变率对 PMMA 材料力学性能的影响。利用扫描电子显微镜对回收的试样进行了显微观察,重点分析不同加载应变率下 PMMA 的微观损伤破坏模式。结果表明:随着应变率的增大,PMMA 的流动应力显著地增加,且冲击加载条件下,峰值应力的应变率敏感性明显高于准静态;在准静态加载条件下,PMMA 试样呈现明显的延性破坏特征,在动态加载条件下则表现为脆性破坏。最后,对 PMMA 材料的 ZWT 粘弹性本构模型参数进行了拟合,拟合结果与实验结果吻合较好,表明该本构模型能够较好地描述较宽应变率范围内 PMMA 材料的应力应变关系。

关键词: 聚甲基丙烯酸甲酯(有机玻璃); 分离式 Hopkinson 压杆实验; 失效模式; ZWT 粘弹性本构关系

中图分类号: O345; O346.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-12-054

0 引言

PMMA 材料是一种透明的热塑性聚合物材料,由于其具有高分子链状分子结构,分子链长而软,因而该材料具有较高的机械强度。另外 PMMA 还具密度小、透光率高和良好的热塑性等特点^[1]。该类材料已经被广泛应用于国民生产的各个行业,例如,目前大部分飞机的风挡、舷窗及战斗机的座舱盖都采用了 PMMA 材料。随着该类材料应用范围的不断扩大,对其在不同载荷下的力学性能及损伤破坏模式的研究显得尤为必要。

对高聚物类材料的力学性能研究由来已久,但大都集中在本构关系及不同加载条件下的力学响应。比较典型的有朱兆祥、王礼立^[2,3]提出的 ZWT 粘弹性本构模型,吴衡毅等^[4]采用多个 Maxwell 单元并联的粘弹性本构模型等,这些模型都能够较好地描述高聚物类粘塑性材料在较宽应变率范围内的应力应变关系。然而目前对 PMMA 材料在不同加载条件下破坏模式的研究相对较少,D. Rittel^[5]等进行了动态加载条件下 PMMA 材料断裂模式的研究,利用 SHPB 设备对含缺口的 U 型盘试样进行了动态压缩实验,研究表明 PMMA 材料动态裂纹的萌生与缺口处微裂纹成核有关。周君等^[6]利用 SHPB 设备对尖槽式中心切口圆盘试件进行了动态压缩实验,对有机玻璃纯 I 型和纯 II 型加载条件下的动态断裂行为进行了研究,结果表明,有机玻璃纯 I 型和纯 II 型断裂韧度随加载随率的增加而增大。但是,由于对 PMMA 材料的微观破坏机理分析较少,目前还没有较好的理论对 PMMA 材料的微观破坏机理进行解释。

^{*} 收稿日期: 2012-04-12 修订日期: 2012-12-04

通讯作者: 谢中秋(1986—), 硕士, 助理工程师。主要研究领域: 导弹总体设计。E-mail: xiezhongqiu@qq.com

本文主要利用 INSTRON 万能试验机和 SHPB 设备,研究 PMMA 材料在准静态和动态加载条件下的应力应变关系。利用扫描电子显微镜对两种加载条件下 PMMA 材料的破坏模式进行对比分析。利用波形整形技术实现了近似恒应变率加载,由此获取了适用于 PMMA 材料的 ZWT 粘弹性本构模型参数。

1 实验方法及过程

PMMA 的准静态压缩实验是通过 INSTRON 万能试验机完成的,试样尺寸为 $\Phi 10\text{mm} \times 10\text{mm}$,加载应变率分别为 $0.1/\text{s}$ 、 $0.01/\text{s}$ 、 $0.001/\text{s}$ 。

PMMA 的动态压缩实验通过 SHPB 设备完成,压杆和子弹的材料均为高强度合金钢,入射杆和透射杆长度均为 1000mm ,子弹长度为 200mm 。试件尺寸为 $\Phi 10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 。图 1 为 SHPB 实验装置示意图。

在动态加载条件下,有机玻璃表现出一定的脆性破坏形式^[5]。对于脆性材料,传统 SHPB 系统很难实现近似恒应变率加载,因此,为保证实验结果的可靠性,对 SHPB 系统作如下改进:

(1) 对入射脉冲进行整形

利用底面直径为 6mm 、厚度为 1mm 的圆片形黄铜整形器对入射脉冲进行整形,将矩形入射脉冲整形为近似幂函数入射脉冲,延长入射脉冲上升沿,减少弥散效应引起的高频振荡,保证有足够的时间使试件内部应力达到均匀。图 2 为子弹速度 25m/s 时的波形信号。由图可以看出,反射波具有一个较长的平缓区,表明在动态压缩的大部分时间内应变率近似恒定。

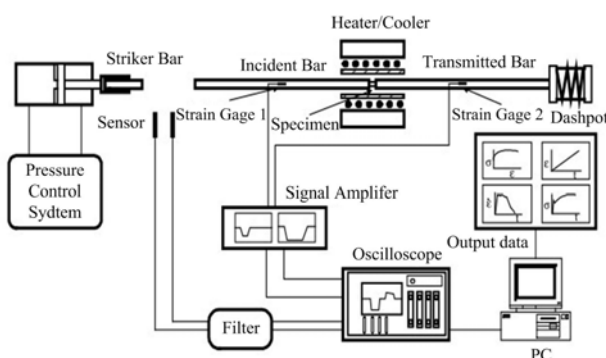


图 1 SHPB 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the SHPB experiment system

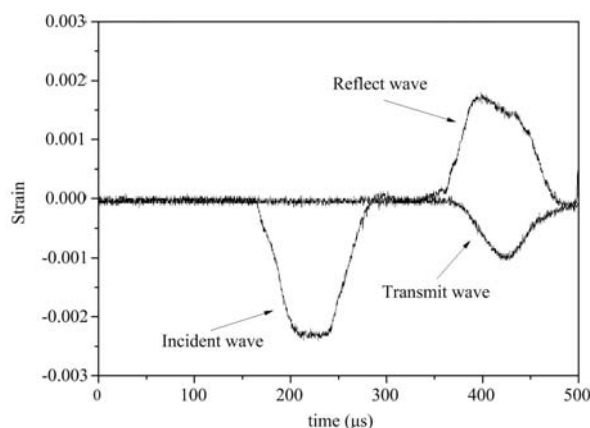


图 2 典型的 SHPB 实验波形

Fig. 2 Typical strain gauge signal

(2) 对试件两端的应力进行直接测量(PVDF 压电计)

利用实验室自制的 PVDF 压电计^[7],对动态压缩过程中试样两端的应力进行实时监测,分析试样在动态压缩过程中的应力均匀性。图 3 和图 4 分别为应力均匀性测试实验的原始信号和积分信号,可以看出,试样两端的应力水平近似一致,表明动态压缩过程中试样内部应力较为均匀,较好地满足了 SHPB 实验的应力均匀性假设,保证了实验结果的可靠性。

2 实验结果分析

2.1 应力应变曲线分析

图 5 为不同加载应变率下 PMMA 的应力应变曲线,其中图 5(a)为准静态加载下的应力应变曲线,图 5(b)为 SHPB 实验得到的不同应变率下的应力应变曲线。

由图 5 可以看出,随着应变率的增加,PMMA 的流动应力表现为明显的正应变率效应,且应力应变曲线呈现明显的应变软化特征。从准静态和动态压缩条件下的应力应变曲线可以看出,在到达峰值应

力前,应力应变曲线呈现明显的两个阶段,即由非线性不显著阶段向非线性显著阶段过渡,且随着应变的增加,应力应变曲线非线性程度逐渐增加,带有明显的迟滞粘弹性特点,这可能与材料内部微裂纹的产生并逐渐加剧以及压缩过程中的热软化效应有关。

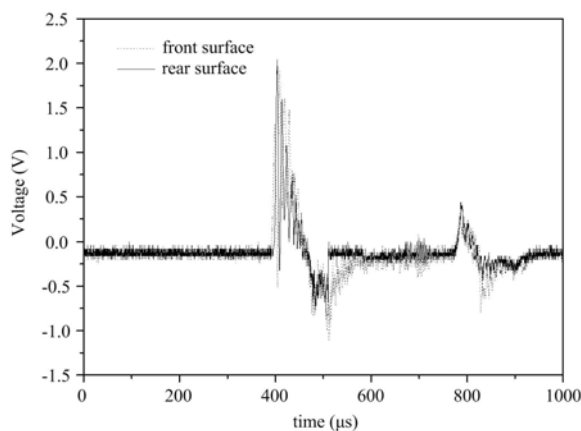


图 3 原始信号
Fig. 3 Original signal

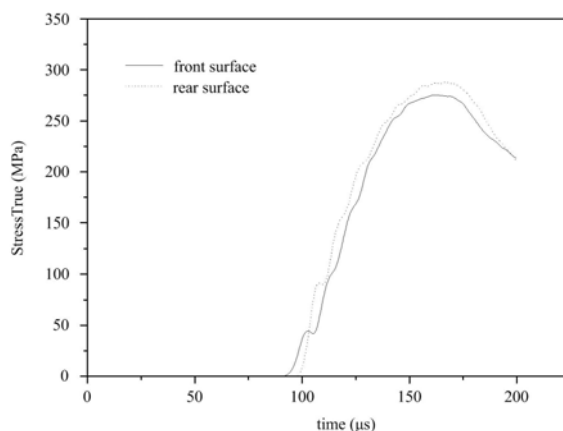


图 4 积分信号
Fig. 4 Integral signal

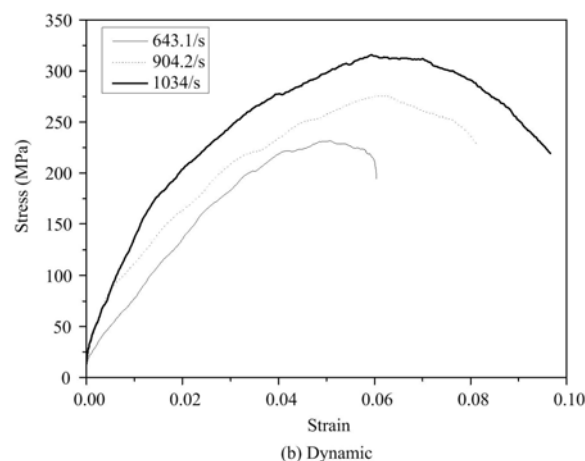
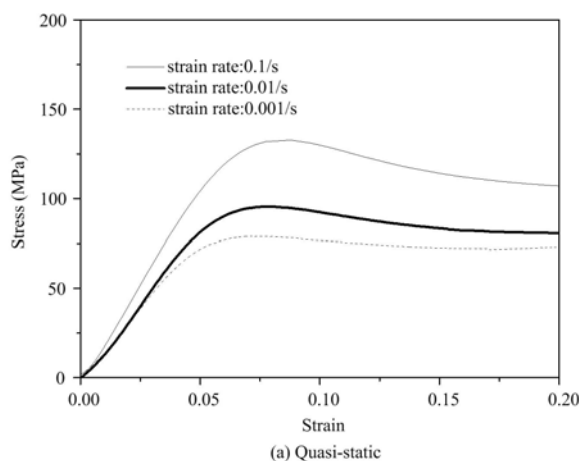


图 5 不同加载应变率下 PMMA 的应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of PMMA under different strain rate

图 6 为应力应变曲线峰值应力与加载应变率的对应关系。由图中可见,在半对数坐标系下,应力峰值随应变率的提高逐渐增加。应变率分别为 0.001/s、0.01/s 和 0.1/s 时,对应的应力峰值分别为 79MPa、100MPa、127MPa。可见,在准静态加载条件下,当应变率分别提高 900%和 9900%时,应力峰值分别提高了 26.5%和 60.8%。应变率分别为 492/s、980.7/s 和 1222/s 时,对应的应力峰值分别为 161MPa、234MPa 和 296MPa。可见,动态加载条件下,当应变率分别提高 99.3%和 148.4%时,应力峰值分别提高了 45.3%和 83.9%。由此可以得出,PMMA 材料在动态加载条件下应力峰值对应变率的敏感性高于准静态。

2.2 宏观破坏模式分析

图 7(a)为压缩前的试样,图 7(b)和图 7(c)分别为加载应变率为 0.1/s 和 0.001/s 时压缩后的试样形貌。可见,在准静态压缩过程中,试样整体未发生分离,仍保持较好的完整性,压缩后的试样边缘位置内部存在明显的劈裂状损伤,试样沿中心位置向外扩展存在大片的“破碎”区域,在此区域内,材料呈细小的颗粒状,但彼此之间并未发生分离,而是粘连在一起,这表明 PMMA 在准静态加载下具有一定的延展性。

图 7(d)和图 7(e)分别为加载应变率为 980.7/s 和 1222/s 时压缩后的试样形貌,可以看出,试样在

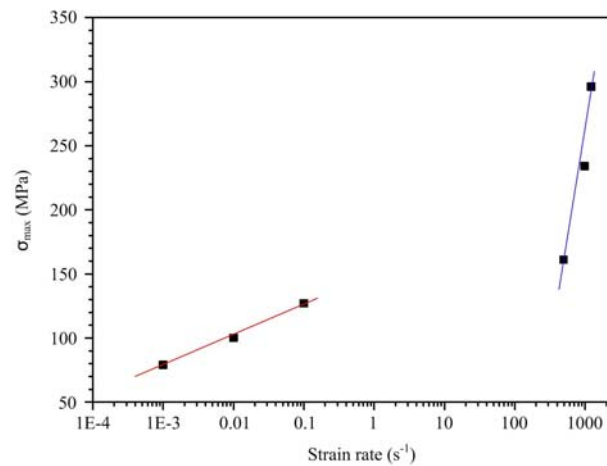


图6 不同加载应变率对应的峰值应力

Fig. 6 Peak stress of PMMA under different strain rate

压缩后未发生明显塑性变形,表明在此加载应变率下材料发生了脆性破坏。当应变率为 980.7/s 时,试样沿与轴线呈 45°方向出现明显的剪切裂纹。当加载应变率为 1222/s 时,试样除沿与轴线呈 45°方向发生破坏外,沿纵向也发生了明显的劈裂状破坏。

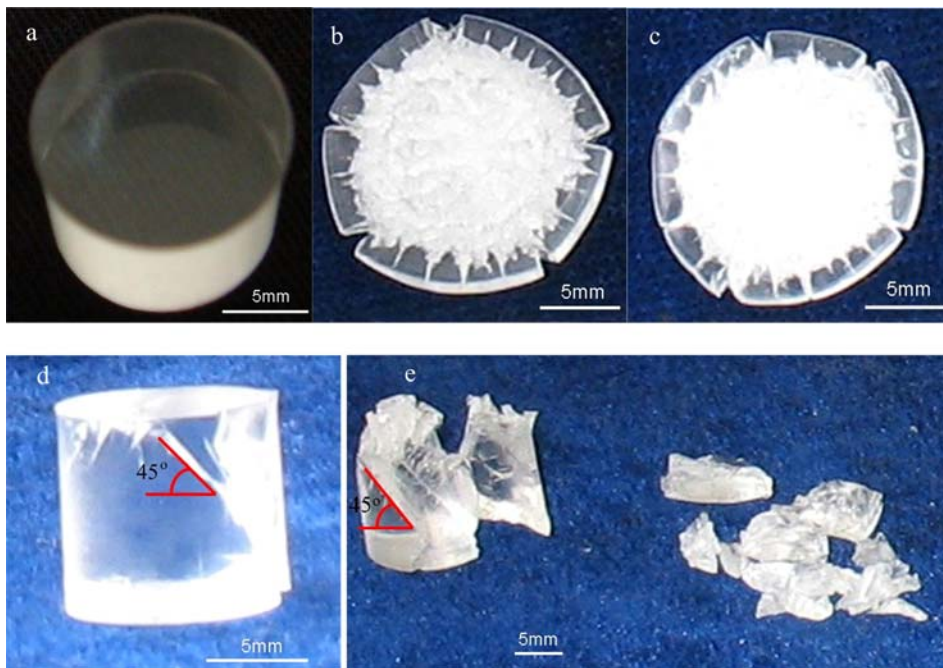


图7 宏观破坏模式

Fig. 7 Macroscopic failure mode of PMMA under different strain rate

由此可以看出,PMMA 在压缩载荷作用下的破坏模式随着应变率的提高发生了明显的转变,即在准静态加载条件下,材料具有一定的延展性,呈现明显的延性破坏特征。在动态加载条件下,呈现明显的脆性破坏特征,且在发生破坏的初期阶段,带有明显的剪切破坏特征。

2.3 微观破坏模式分析

图 8 为对准静态压缩和动态压缩后回收试样的扫描电镜照片,其中图 8(a)、图 8(b)和图 8(c)对应的加载应变率为 0.001/s,图 8(d)、图 8(e)和图 8(f)对应的加载应变率为 1222/s。可以看出,在准静态加载条件下,材料断口处分布着许多撕裂韧窝,如图 8(a)~图 8(c)中圆圈内区域所示,表明准静态加载条件下 PMMA 材料发生了明显的延性破坏。

在动态加载条件下,试样断口表面上有一系列的台阶状损伤区域,且一系列间距较近的台阶逐层合

并,形成更大的台阶,这些都是典型河流花样的特征^[8],如图 8(d)和图 8(e)所示,其中图 8(e)中的河流花样为图 8(d)中众多河流花样之一,表明 PMMA 材料发生了脆性破坏。Friedel^[9]基于位错理论对河流花样的形成进行分析,认为河流花样主要是解理沿相互平行的许多平面以不连续方式开裂形成的。不在一个平面上的解理裂纹在扩展时,通过螺型位错相交时产生解理台阶,如图 8(f)所示。解理台阶在裂纹扩展过程中逐渐汇合,直至断裂。河流花样就是裂纹扩展中解理台阶在微观断口的表现。裂纹扩展方向沿河流方向,如图 8(e)中箭头所示。

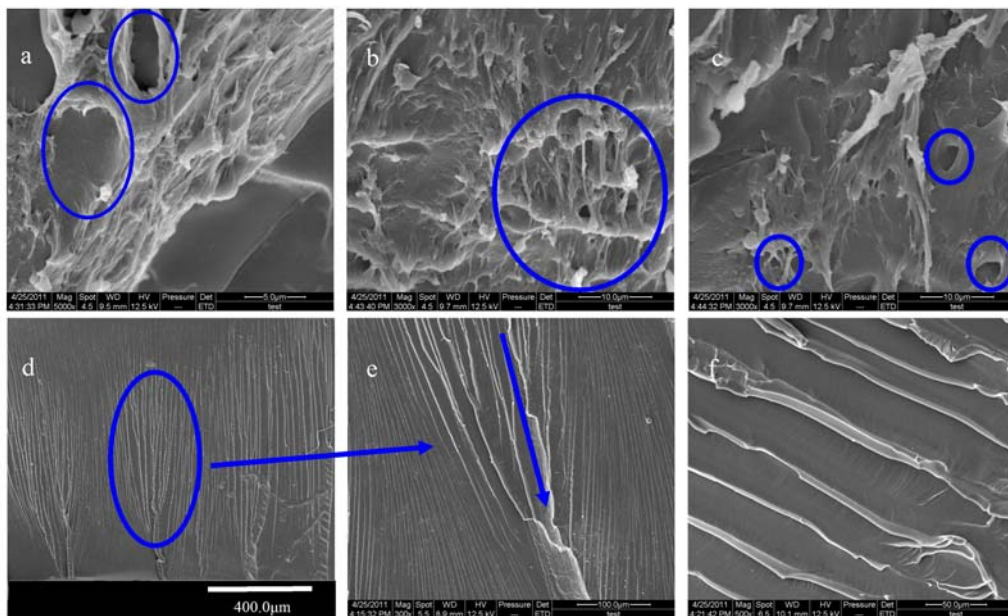


图 8 断口扫描电镜照片

Fig. 8 SEM photos of fracture

对比准静态和动态压缩条件下 PMMA 的破坏模式可以发现,随着加载应变率的增加,PMMA 材料的破坏模式发生了由延性到脆性的转变,这可能是随着加载应变率的提高,产生不稳定裂纹所需要的能量降低,使得发生脆性断裂的可能性增大^[10]。

2.4 应变率相关本构

对 PMMA 应力应变曲线特征分析可知,曲线带有明显的迟滞粘弹性特征。因此,本文采用含应变率效应的 ZWT 粘弹性本构模型描述 PMMA 材料的力学行为。

ZWT 本构模型由一个非线性弹簧及两个不同特征时间的 Maxwell 体并联组成,如图 9。

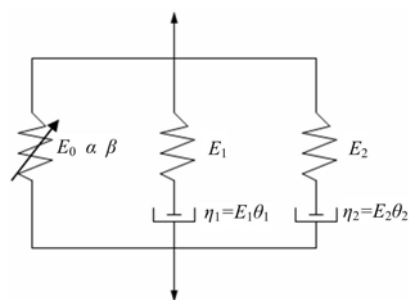


图 9 ZWT 粘弹性本构模型

Fig. 9 ZWT viscoelastic constitutive model

其积分形式表达式为:

$$\sigma = E_0 \epsilon + \alpha \epsilon^2 + \beta \epsilon^3 + E_1 \int_0^t \dot{\epsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\epsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (1)$$

其中: σ 表示应力; ϵ 为应变; t 为时间。 E_0 、 α 和 β 为反映应变率无关的非线性弹性响应弹性常数。两个积分式分别描述低应变率和高应变率下不同的粘弹性行为, E_1 、 θ_1 、 E_2 、 θ_2 分别为低频和高频 Maxwell 体的弹性常数和特征时间。

由于 PMMA 试样的动态压缩实验采用了波形整形技术,使得试样加载应变率在较长时间内处于近似常值,由此,可将(1)式写为:

$$\sigma = E_0 \epsilon + \alpha \epsilon^2 + \beta \epsilon^3 + E_1 \theta_1 \dot{\epsilon} (1 - e^{-\frac{\epsilon}{\theta_1}}) + E_2 \theta_2 \dot{\epsilon} (1 - e^{-\frac{\epsilon}{\theta_2}}) \quad (2)$$

本文所有实验均是在常温下完成,且不考虑损伤及热软化对材料力学性能的影响,利用三组不同应

变率下的应力应变曲线进行参数拟合,参数拟合结果见表 1。

表 1 ZWT 粘弹性本构模型参数拟合结果

Tab.1 Fitted results of modified ZWT

α	β	E_0 (GPa)	E_1 (GPa)	θ_1 (s)	E_2 (GPa)	θ_2 (s)
27274	-319952	0.844	13.78	$1.21\text{e}-5$	0.838	1.257

图 10 为实验结果和本构模型拟合结果的对比。可以看出,两者吻合较好,说明该本构模型能够较好地在大应变率范围内描述 PMMA 材料的力学行为。

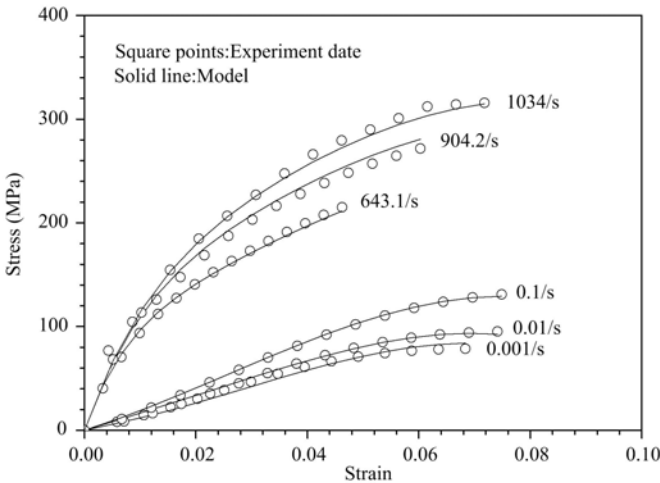


图 10 ZWT 粘弹性模型参数拟合结果与实验数据

Fig.10 Fitting result of viscoelastic constitutive model and experiment data

3 结论

本文研究了 PMMA 材料在准静态和动态加载条件下的力学响应,并对其准静态和动态加载条件下的破坏模式及本构模型进行了研究。主要得到以下结论:

(1) 在 SHPB 实验中,通过入射脉冲波形整形技术实现了动态压缩过程中的近似恒应变率加载,并有效地保证了动态压缩过程中试样内部的应力均匀性。

(2) PMMA 材料的流动应力表现出较强的应变率敏感性。随着加载应变率的提高,流动应力和峰值应力都有明显提升,且动态加载条件下的应变率敏感性要高于准静态。

(3) PMMA 材料在准静态加载条件下发生明显的延性破坏,在动态加载条件下呈现明显的脆性破坏特征。

(4) 通过对 PMMA 应力应变曲线分析,发现其具有明显的迟滞粘弹性特点,并拟合出了适用于 PMMA 材料的 ZWT 粘弹性模型参数,实验结果与拟合结果吻合较好。

参考文献:

- [1] 程军,方如华,林治平. 有机玻璃的光塑性及应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2001, 17(2):21-23 (CHENG Jun, FANG Ru-hua, LIN Zhi-ping. Photoplasticity And Application Of Polymethyl Methacrylate [J]. Polymer Materials Science And Engineering, 2001, 17(2):21-23(in Chinese))
- [2] 朱兆祥,徐大本,王礼立. 环氧树脂在高应变率下的热粘弹性本构方程和时温等效性[J]. 宁波理工大学学报(理工版), 1988, 1(1):58-68 (ZHU Zhao-xiang, XU Da-ben, WANG Li-li. Thermoviscoelastic Constitutive Equation and Time-Temperature Equivalence of Epoxy Resin at High Strain Rates [J]. Journal of Ningbo University, 1988, 1(1):58-68(in Chinese))
- [3] 周风华,王礼立,胡时胜. 有机玻璃在高应变率下的损伤型非线性粘弹性本构关系及破坏准则[J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(4):333-342 (ZHOU Feng-hua, WANG Li-li, HU Shi-sheng. A Damage-Modified Nonlinear Visco-

- Elastic Constitutive Relation and Failure Criterion of Pmma at High Strain-Rates [J]. Explosion and Shock Waves, 1992, 12(4):333—342(in Chinese))
- [4] 吴衡毅, 马钢, 夏源明. PMMA 低、中应变率单向拉伸力学性能的实验研究[J]. 实验力学, 2005, 20(2):193—199 (WU Heng-yi, MA Gang, XIA Yuan-ming. Experimental Study on Mechanical Properties of PMMA under Unidirectional Tensile at Low and Intermediate Strain Rates [J]. Journal of Experimentalmechanics, 2005, 20(2): 193—199(in Chinese))
- [5] Rittel D, Maigre H. An investigation of dynamic crack initiation in PMMA[J]. Mechanics of Materials, 1996, 23:229—239.
- [6] 周君, 汪洋, 夏源明. 有机玻璃纯 I 型和纯 II 型动态断裂行为的实验研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2008, 24(2): 10—18 (XIA Xiu-yang, ZHENG Jian-wei, WANG Wei, et al. Preparation and Characterization of Polyurethane/Epoxy Resin LIPN [J]. Polymer Materials Science And Engineering, 2008, 24(2):10—18 (in Chinese))
- [7] 庞宝君, 杨震琦, 王立闻 等. PVDF 压电计的动态响应特性及其在橡胶材料 SHPB 实验中的应用 [J]. 高压物理学报, 2010, 24(5):359—367 (PANG Bao-jun, YANG Zhen-qi, WANG Li-wen, et al. PVDF Stress Gauges Dynamic Stress Measurement and Its Application to SHPB Test for Rubber Materials [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(5):359—367(in Chinese))
- [8] Derek Hull. Fractography Observing, Mesuring and Interpreting Fracture Surface Topography[M]. Cambridge University Press, 1999.
- [9] Friedel J. Dislocations [M]. Pergamon Press, 1964.
- [10] 崔约贤, 王长利. 金属断口分析[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1998:69—70 (CUI Yue-xian, WANG Chang-li. Analysis of metal fracture surface [M]. Harbin Institute of Technology Press, 1998: 69—70 (in Chinese))

On the Dynamic Compressive Mechanical Properties and Strain Rate Related Constitutive Model of PMMA Material

XIE Zhong-qiu, ZHANG Peng-peng

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: In order to investigate the effect of loading strain rate on the mechanical properties of PMMA, uniaxial compression test of PMMA in a large strain rate range was performed by using INSTRON universal testing machine and split Hopkinson pressure bar system (SHPB). Microstructure of deformed samples was microscopically observed based on SEM technique, microscopic damage and failure mode of PMMA at different loading strain rates are the focus of analysis. Results show that the flow stress of PMMA increases obviously with the increase of loading rate; under high strain rate loading condition, the strain rate sensitivity of peak stress is obviously higher than that in quasi-static region; under quasi-static loading condition, PMMA sample shows obvious ductile failure characteristics, while under dynamic loading condition, it presents brittle failure characteristics. Finally, PMMA ZWT visco-elastic constitutive model parameters were fitted, which show good coincide with experimental data. So it indicates that this constitutive model can better describe stress-strain relation of PMMA in a wider range of strain rate.

Keywords: Polymethylmethacrylate (PMMA); Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) experiment; Failure mode; ZWT visco-elastic constitutive relation