

聚合物在高应变率下的动态力学性质实验研究

曾新吾^a G. Swallow^b S. Hamdan^c

(^a 长沙工学院应用物理系 长沙 410073)

(^b 英国 Loughborough 大学物理系 Loughborough, LE11 3TU, UK)

(^c 马来西亚 Pertanian 大学物理系 Serdang 43400 Selangor, Malaysia)

摘要 介绍了利用一种新型的落重和高速摄影实验系统对三种常见的聚合物 (PC, PEK 和 PEEK) 在高压应变率下的力学性质的研究结果。所使用的实验系统在常规落重装置的基础上, 增加了高速摄影系统, 实现了应力和应变过程的同时测量。从而使得在一次实验中可同时获得应力和应变数据, 避免了这类实验中常用的变形过程中体积不变的假设, 使得结果更加可靠, 并可验证材料的泊松比。给出了上述三种聚合物在常温下的真应力与自然应变的关系。结果表明, 在室温下, 当应变率约为 1000s^{-1} 时, 这三种材料的屈服应力分别为 128MPa 、 204MPa 和 180MPa 。三种材料均具有很好的冲击韧性, 断裂应变均在 50% 以上。对不同环境温度下, PEEK 的实验结果表明, 随温度的增加, 屈服应力将下降。

关键词 高应变率 力学性质 聚合物

中图分类号 O 347. 4*

1 引言

随着科学技术的发展, 聚合物以其独特的性质而在承受各种脉冲动载 (如碰撞、爆炸、电磁脉冲、热脉冲等) 的设备和部件中得到广泛的应用, 其中一些已替代了资源日异减少的金属材料。为精确和可靠地设计和分析这些受动载结构的响应特性, 要求我们对在其工作应变率下的材料力学性能有较清晰的了解。但是, 到目前为止, 对聚合物在高应变率下的力学性能的研究并不是十分充分^[1], 这方面的研究是目前材料动态力学性能的研究热点之一^[2-3]。

对于聚合物, 其力学性质往往是与应变率及温度相关的。在不同的应变率下, 测量其动态力学性能的方法也不相同。一般在应变率为 $10^2 \sim 10^3\text{s}^{-1}$ 量级的情况下, 材料的动态力学性质通常是用 Kolsky 提出的分裂式霍普金森压杆 (SHPB) 来进行测量的^[4-5]。在这一实验方法中, 当被测材料的泊松比未知时, 要从所测量到的压力值和应变值导出样品中的真应力-自然应变关系, 常常需要假设样品在变形过程中的体积保持不变。该假设对金属材料的有效性已通过实验得到证实^[6]。但是, 对于较容易变形的聚合物而言, 这一假设能否成立还从未得到证实。

为克服这一困难, 我们设计了一种新型的落重-高速摄影实验系统^[7]。这一系统用加速度计测量样品的轴向加速度, 进而换算成轴向变形, 同时它又通过高速摄影测量样品的横截面变

* 曾新吾: 男, 1963年 3月生, 博士, 教授, 博导。

1998-06-15收到原稿, 1998-08-13收到修改稿。

形,从而可以直接测量材料的应力应变关系。这一系统,不仅可以避免假设样品变形过程中体积守恒,而且还可用来测量其动态泊松比,从而验证体积守恒的假设。利用这一实验系统,对聚碳酸酯 (Polycarbonate, 简称 PC)、聚醚酮 (Polyetherketone, 简称 PEK), 和聚醚醚酮 (Polyetheretherketone, 简称 PEEK) 等聚合物进行了研究。

2 落重-高速摄影实验测量系统

传统的落重实验系统是将重物(落锤)升到一定的高度,然后让其在导杆的引导下自由落体在样品上,以产生所需的冲击压力。这一装置原来广泛用于炸药在高压和碰撞下的敏感性研究^[8,9]。在我们这里的系统是在传统落重系统上的一种改进,我们增加了一些测量装置,使得整个系统可以同时测量压力(通过加速度计)和应变(通过高速摄影)。这样我们可以从一次实验中得到样品的真应力-自然应变关系。

整个系统的基本构型由落重计和高速相机以及数据采集和处理系统组成,如图 1 所示。所使用的高速相机是一种等待式高速分幅相机,它一次可以照相 140 幅,每幅间最小时间间隔可达 $5\mu\text{s}$ 。实验操作通常在暗室中进行,两幅照片之间的时间间隔由事先选定。光源为一闪光灯,正好在碰撞前触发,这样每一次试验中可以得到从静态到动态的样品变形过程的照片。由高速摄影提供的照片可以记录样品的径向膨胀。假设样品在变形过程中不发生鼓型变形,则由此可以直接得到径向应变和应变率。实验表明,在界面润滑,试件纵横比大于 2 时,鼓形变形很小。这种方法的优点是可以直接

观察样品的变形过程,任何阶段的非均匀变形都可以被记录下来。通过照片,我们还可以看到样品在碰撞前、碰撞后的弹性变形、塑性变形以及断裂等一系列过程。

落重是产生冲击载荷的装置。在本实验中,锤重 6kg,其端部装配有一玻璃砧。在系统的基座上也装配有一同样的玻璃砧,样品就置于这两个玻璃砧之间。在落重和基座上各有一个洞以使光线通过而对样品照相。落锤自由落体,但由导杆导向碰撞在样品上。落重锤上装有一加速度计以记录碰撞过程中落重的减速过程,从而得到样品上所受的力。

在整个试验系统中,有两个独立的测量系统:高速摄影和加速度计。要获得样品的动态应力-应变曲线,关键在于怎样使这两个系统的记录在时间上对应起来。为此,我们使用光电二级管来记录闪光灯的闪光过程,同时得到闪光记录和加速度记录。由于相机是等待式的,只要光的强度足够就可以记录到信号,故闪光开始时间也就是照相的开始时间。照相间隔是事先设定的。

关于整个系统的标定和数据处理方法请参阅文献^[7]。

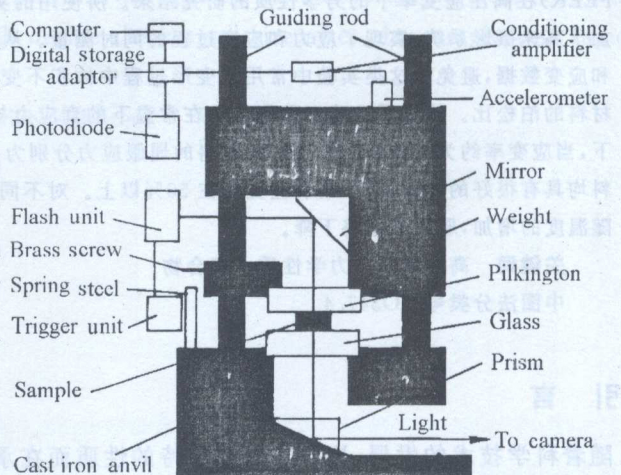


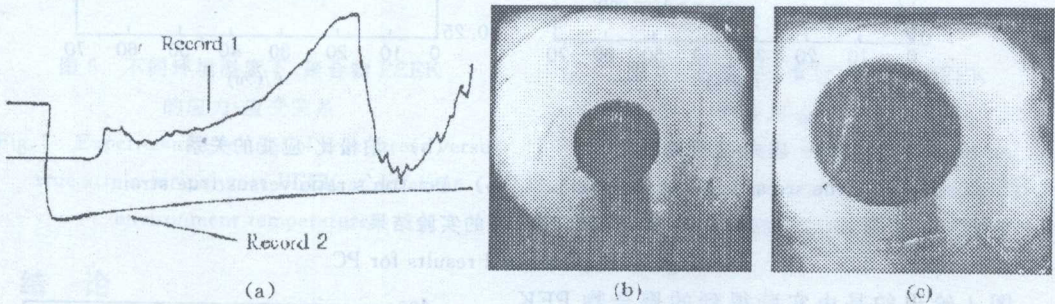
图 1 落重-高速摄影实验系统示意图

Fig. 1 Configuration of the weight-drop and high speed camera experimental system

3 实验结果和讨论

利用上面介绍的实验系统,我们测量了PC、PEK和PEEK等3种材料的应力-应变关系。在所用实验中,所用材料均为英国ICI塑料公司生产。实验样品被加工成直径为6.0mm、高3.0mm的圆柱体。样品被放置在两个直径为50mm的玻璃砧之间。为减少随机误差,每一实验都重复了3次。实验中,落重高度为0.46m,在碰撞前落重的速度约为3.0m/s。在这一加载条件下,样品中的初始应变率约为 $1.0 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ 。为减少界面摩擦力的影响,除特殊说明外,所有实验中我们在样品与玻璃砧的界面上加了一薄层润滑剂。

图2是一组典型的实验记录。在图2(a)中,记录1为通过光电二极管得到的闪光强度,在我们的数据处理中仅需要其起跳时间;记录2是在30kHz高频截断滤波后加速度计的记录,由此可以导出样品的轴向应变,以及加在样品上的轴向力。图2(b)和图2(c)是变形前($t=0$)和 $t=0.72\text{ms}$ 时的高速摄影实验照片(在一次实验中,共有148张高速摄影照片)。



(a) 为数据采集系统的闪光强度记录和加速度计的记录;

(b)和(c)分别为两张高速摄影照片(每次实验共148张)

(a) is the recordings of flash intensity and accelerometer;

(b) and(c) shows 2 of the 148 photographs from the high speed camera

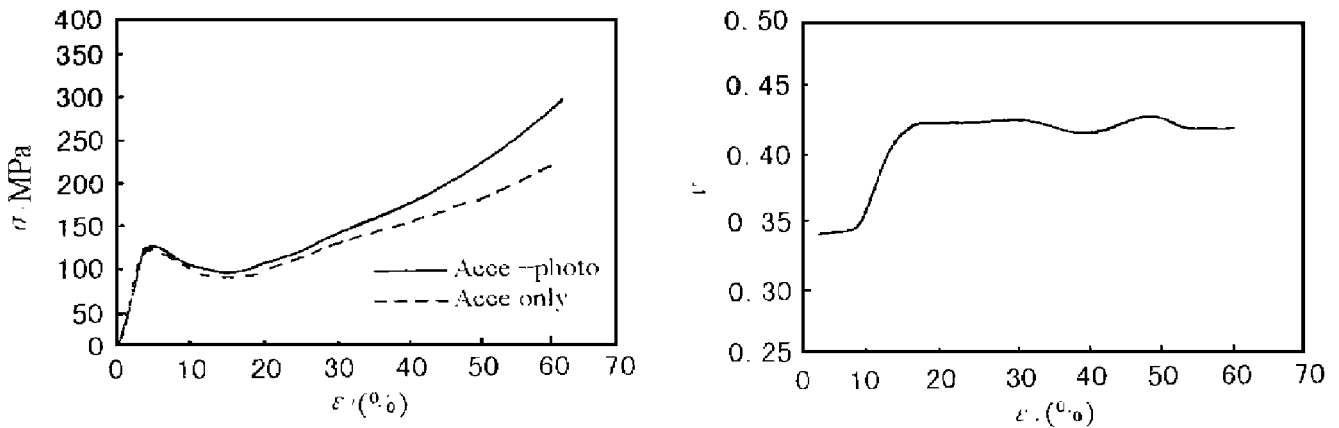
图2 典型的实验记录

Fig. 2 Typical experimental records

图3a显示的是由实验得到的在室温(约20℃)下PC的应力-应变曲线。实线为结合加速度计记录和高速摄影记录得到的真应力与自然应变之间的关系曲线。作为对比,假设样品在变形过程中体积不变而直接由加速度计得到的应力-应变曲线用虚线划出。从这一测量曲线,我们得到材料的主要参数为:屈服应力 $\sigma_{\text{yield}} = 128.6 \pm 18 \text{ (MPa)}$,对应的屈服应变为 0.066 ± 0.003 。在弹性变形阶段,当应力小于 $\sigma_{\text{linear}} = 108 \pm 13 \text{ (MPa)}$,变形为线弹性,其弹性模量为 $1624 \pm 61 \text{ (MPa)}$ 。超过该应力时,变形为非线性弹性变形。当材料进入塑性变形后,首先出现软化,然后又转呈塑性硬化直至断裂。PC的平均断裂应变为0.63。从实验照片及回收的样品中的观察都显示,断裂时样品呈玻璃状破碎。没有观察到金属中常见的 45° 滑移线。这一结果说明绝热剪切并不是这一材料破坏的机理。

图3b为实验测量到的泊松比随应变的变化。比较应力-应变关系可以看到,在弹性变形以及应变软化阶段,泊松比约为 0.34 ± 0.1 ,在塑性变形阶段,泊松比基本稳定在 0.42 ± 0.04 。应该说明的是,由于我们的横向变形是直接由人工判读的,而在应变较小时,泊松比对测量误差是十分敏感的。这就是初始阶段的泊松比的测量误差较大的原因。

比较图 3a 中的两条曲线, 在变形的初始阶段, 虽然我们测量到的泊松比只有 0.34 但由于变形较小, 对由体积不变 (泊松比为 0.5) 换算的样品截面积影响并不大。所以在这一阶段, 直接由加速度计测到的真应力-自然应变关系与结合加速度计记录和高速摄影记录得到的真应力-自然应变曲线之间的差别很小。而随着变形的增加, 样品的泊松比在 0.42 左右。故根据体积不变假设计算的截面面积比实际测量的要大一点。因而真实应力-应变曲线 (实线) 要略高于单纯由加速度计测量的应力-应变曲线 (虚线), 随应变的增加, 体积不变的假设带来的误差也增加, 两条曲线之间的差别增大。



(a) 应力-应变曲线

(b) 泊松比-应变的关系

(a) True stress versus true strain

(b) Poisson's ratio versus true strain

图 3 聚合物 PC 的实验结果

Fig. 3 Experimental results for PC

图 4 给出的是由实验得到的聚合物 PEK 的应力-应变关系。样品几何尺寸和加载条件与 PC 的相同。总的来看, PEK 的应力-应变曲线与 PC 的在形态上基本上一致。数值上, PEK 的屈服应力为 $204 \pm 15 \text{ MPa}$, 屈服应变为 0.07 ± 0.05 。材料屈服后有较长的一段软化期, 但软化数值很小。PEK 的断裂应变为 0.74。我们测量到的泊松比基本接近于 0.5, 所以图中加速度计与高速摄影联合测量的结果与只用加速度计而假设体积不变所得到的结果基本上相同。

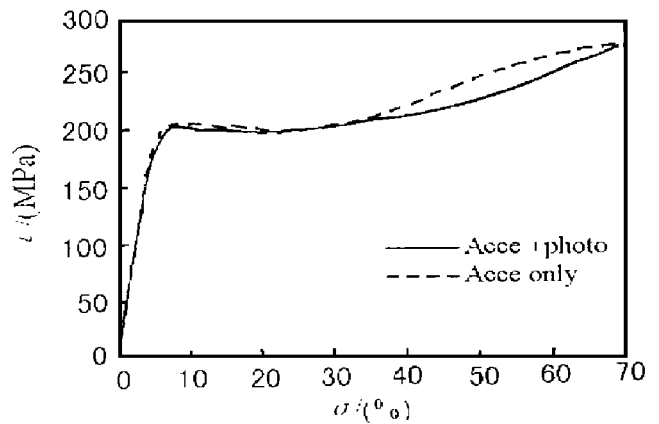


图 4 聚合物 PEK 的应力-应变关系

Fig. 4 Experimental results of true stress versus true strain for polymer PEK

图 5 为 PEEK 的应力-应变关系。为研究温度对其性能的影响, 我们在不同环境温度下对其进行了实验测量。在常温下, PEEK 的实验结果与 PEK 的类似。在数值上, PEEK 的屈服应力为 $142 \pm 20 \text{ MPa}$, 低于 PEK, 屈服应变为 0.045。材料屈服后的硬化速度要高于 PEK。当温度增加时, 屈服应力下降。要特别解释的是在温度为 120°C 和 140°C 的应力-应变曲线上出现交叉。这是由于当环境温度高于聚合物的玻璃相变温度 (约 130°C) 时, 实验样品将出现较大程度的结晶, 因而出现应力-应变曲线的交叉^[8]。

对于 PEEK, 我们还在不同应变率下测量了其应力-应变关系。图 6 给出的是在五种不同

应变率下的应力-应变曲线。很明显,随着应变率增大,屈服应力也增加。同时,也可以看到,对于 PEEK,在高应变率下,材料屈服后的硬化速率大。

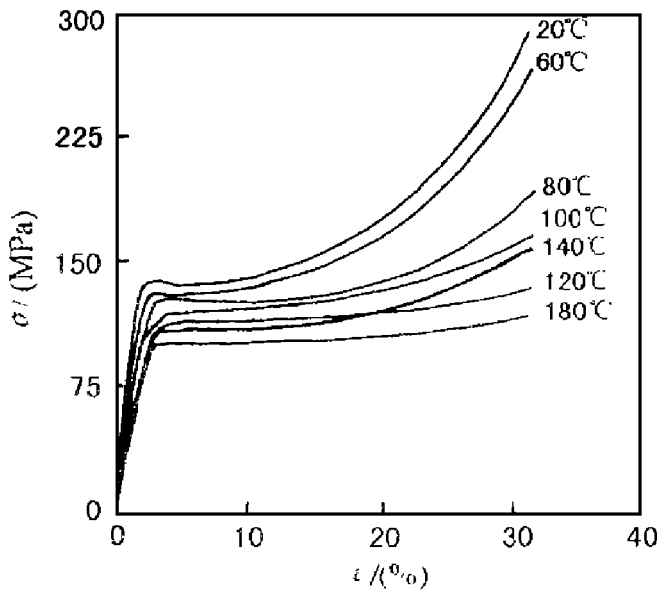


图 5 不同环境温度下, 聚合物 PEEK 的应力-应变关系

Fig 5 Experimental results of true stress versus true strain for polymer PEEK at different environment temperatures

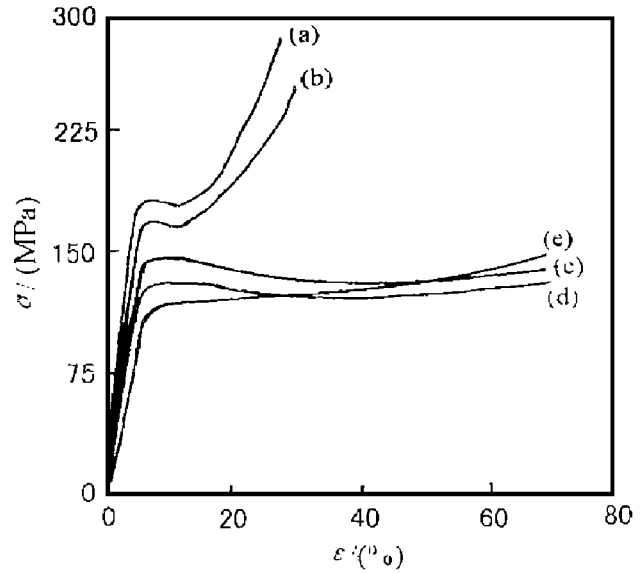


图 6 不同应变率下, 聚合物 PEEK 的应力-应变关系

Fig 6 True stress versus true strain for PEEK at different strain rate (a) 2000s^{-1} ; (b) 1000s^{-1} ; (c) 500s^{-1} ; (d) 7s^{-1} ; (e) 0.001s^{-1}

4 结 论

我们用新型的落重-高速摄影系统进行了聚合物 PC、PEK 和 PEEK 的力学性质测量。从该项研究中,我们可以得到如下几点结论:

1 所实验的聚合物在变形的初始阶段呈线弹性特征,但在屈服前,有较长的非线性弹性段。聚合物的屈服应力并不高,所实验的三种材料均在 210MPa 之下。但聚合物的屈服应变较大,在 6% 左右。

2 所实验的聚合物在屈服后均有应变软化阶段,然后再显应变硬化直至断裂。PC 和 PEK 的断裂应变分别为 65% 和 73% 。在实验测量的应变范围 (40%) 内,PEEK 没有断裂。回收的样品中,PC 和 PEK 均呈玻璃状断裂,没有观察到金属断裂时常见的 45° 滑移线。这表明绝热剪切并非这类聚合物的断裂机理,更倾向于支持微细裂纹断裂机理^[9-10]。

3 由于聚合物是温度和应变率敏感材料,本文中的实验结果仅在应变率约 10^3s^{-1} 时成立。PC 和 PEK 的结果还要求是室温 (约 20°C)。但进一步实验发现,在温度和应变率改变时,应力-应变曲线的基本形态不变。应变率增加时,屈服应力增加;但温度增加时,屈服应力下降。

4 在弹性变形阶段,虽然泊松比可能较小,由于体积变化也不大,体积不变的假设对应力-应变曲线影响不大。随着应变的增加,体积不变的假设带来的误差也将增大。对聚合物 PEK 和 PEEK,塑性变形阶段的体积近似不变。而对聚合物 PC,则必须考虑体积的变化带来的影响。

参 考 文 献

- 1 Bragov A M, Lomunov A K. Mechanical Properties of Some Polymers and Composites at Strain Rate of 100s^{-1} . *Journal de Physique IV*, 1994 C 8 337~ 342
- 2 王礼立, Pluinage G, Labibes K. 高聚物在冲击载荷下的粘弹性波与粘弹性本构特性. *爆炸与冲击*, 1995 15(增刊): 3~ 4
- 3 胡时胜, 刘剑飞, 冯建平. 硬质聚氨酯泡沫塑料动态力学性能的研究. *爆炸与冲击*, 1996 16(4): 373~ 376
- 4 Kolsky H. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading. *Proc Phys Soc Lond*, 1949 Vol B62 676~ 700
- 5 朱卡斯 JA, 等. 碰撞动力学. 北京: 兵器工业出版社, 1989 336~ 360
- 6 Field J W alley S, Bourne N, Huntley J Experimental Methods at High Rate of Strain. *Journal de Physique IV*, 1994 C 8 3~ 22
- 7 曾新吾, Hamdan S, Swallowe G. 测量聚合物在高应变率下力学性质的实验系统. *国防科技大学学报*, 1997, 19(5): 87~ 91
- 8 Heavens S, Field J The Ignition of a Thin Layer of Explosive by Impact. *Proc R Soc London A*, 1974 388 77~ 93
- 9 Field J Swallowe G, Pope P H, Plamer S J P. Mechanical Properties at High Rate of Strain. *Institute of Physics Conference, Serial No 70* 1984 381~ 388
- 10 Hamdan S, Swallowe G. The Strain-rate and Temperature Dependence of the Mechanical Properties of PEK and PEEK. *JM at Sci* 1996 31: 1415~ 1423

EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE DYNAMIC MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMERS UNDER HIGH STRAIN RATE

Zeng Xinwu^a, G. Swallowe^b, S. Hamdan^c

(a. Department of Applied Physics, Changsha Institute of Technology, Changsha, Hunan, 410073)

(b. Department of Physics, Loughborough University of Technology,
Loughborough, LE 11 3TU, UK)

(c. Department of Physics, Universiti Pertanian Malaysia, Serdang 43400, Selangor, Malaysia)

ABSTRACT In this paper, we present our research results on the dynamical mechanical properties of three polymers (Polycarbonate (PC), Polyetherketone (PEK) and Polyetheretherketone (PEEK)) under high strain rate with the use of an improved drop-weight-camera experimental system. As this improved experimental system allows us to take high speed photograph as well as the stress history, we could measure the true stress and true strain of the sample under impact from one shot. This enables us to avoid assuming the volume of the sample is constant during the deformation, a commonly used assumption in such kind of experiment, and made the experimental results more reliable, and could check the value of Poisson's ratio. We present the experimental results of true stress-true strain relation of these three polymers under the strain rate of 1000s^{-1} . The results show that all these three polymers have a good shock toughness. As the polymers are sensitive to strain rate and also the experimental temperature, the results shown in this paper are only valid for the same strain rate and temperature as given in the paper.

KEY WORDS high strain rate, mechanical properties, polymer