

测量聚合物在高应变率下力学性质的实验系统*

曾新吾 G. M. Swallowe S. Hamdan

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

摘要 本文介绍了一种用于测量材料在高应变率下单轴应力—应变性能的实验测量系统:落重与高速摄影实验系统。该系统在现有的落重装置的基础上,增加了高速摄影和应力过程的同时测量,使得在一次实验中可同时取到应力应变数据。从而避免了这类实验中常用的变形过程中体积不变的假设。通过高速实验提供的实验照片,我们还可以观察到聚合物在高应变率下从变形到断裂的发展过程。

关键词 力学性质, 高应变率, 聚合物

分类号 O353

Experimental System for Measuring the Mechanical Properties of Polymer Under High Strain Rate

Xinwu Zeng¹ G. M. Swallowe² S. Hamdan³

(¹Dept. of Appl. Phys., Changsha Institute of Tech., Changsha, 410073

²Dept. of Phys., Loughborough Univ. of Tech., Loughborough LE11 3TU, UK

³Dept. of Phys., Univ. Pertanian Malaysia, Serdang 43400, Malaysia)

Abstract This Paper describes a technique developed to measure the uniaxial compressive stress—strain properties of polymers at the strain rate appropriate to ballistic and impact events over time scales of tens of microseconds using a Dropweight—Camera system. The instrument constructed represents a novel development of existing equipment types. The results obtained from compression testing give stress and strain measurements at strain rates of up to 10^3s^{-1} and over a temperature range of 20—200°C. The stress and strain can be independently obtained simultaneously. This dropweight—camera system has the capability of providing direct visualisation simultaneously with stress information of the processes occur-

* 1997年5月30日收稿

ring during the deformation and fracture of materials.

Key words mechanical properties, high strain rate, polymer

材料在高应变率下的力学性质通常用分裂式霍普金森压杆(SHPB)来测量^[1]. SHPB技术是为测量金属在高应变率下的力学性能而发展起来的,现已是一项相当成熟的技术。用这一技术进行测量时,一个不可缺少的假设是被测样品在变形过程中的体积保持不变。对金属材料,这一假设的正确性已得到实验验证^[2]。但是,对于较容易变形的聚合物而言,在变形过程中(特别是当应变较小时)其体积保持不变的假设则还从未得到证实。本文所描述的落重—高速摄影实验系统可以作为传统的 SHPB 实验技术的一种补充。

1 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)升高到一定的高度,然后让其自由落体在样品

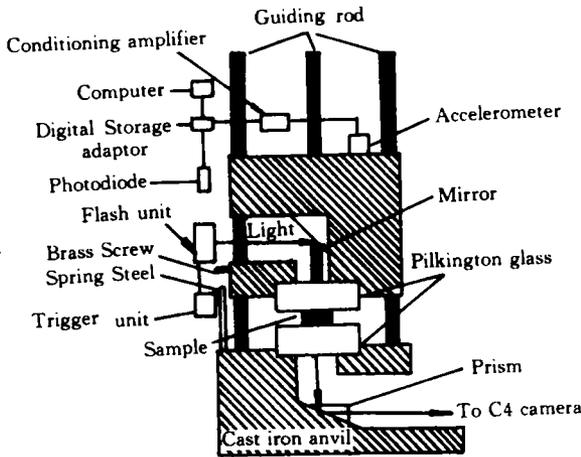


图1 落重—高速摄影系统示意图

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敏感性研究^[3]。我们这里介绍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)。

整个系统由落重机和高速相机以及数据采集和处理系统组成,如图1所示。我们使用的高速相机是一种等待式高速分幅相机,一次可以照像140幅,每幅间最小时间间隔可达 $5\mu\text{s}$ 。落重机锤重6kg,其端部装配有一玻璃砧。在落重系统的钢砧(基础)上也装配有一同样的玻璃砧,样品置于这两个玻璃砧之间。在落重和基础上各有一个洞以使光线通过,对样品照相。落重锤自由落体,但由导杆导向直接碰撞在样品上。

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。如果假设在碰撞过程中样品和落重之间的界面保持接触,则从加速度计的测量中还可以得到样品界面的轴向变形。进一步假设变形过程是均匀的(无鼓形变形发生),则由此可以得到样品的轴向应变。

照相机是等待式的,只要光强足够,就可记录到信号。在落重锤的侧面有一闪光灯光源。光源正好在碰撞前被触发,这样保证每一次试验中可以得到样品的几幅静态照片,以用来在底片判读时确定放大倍数。从高速摄影照片可以得到样品的径向膨胀。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。这种方法的优点是可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,还可以看到样品在碰地撞前,碰撞后的弹性变形、塑性变形以及断裂等一系列过程。底片的判读是在普通的底片投影装置上进行的。径向应变测量的精度取决于人对聚合物盘片的边界的判读,一般其典型误差小于0.5%。我们目前正在改造此设备使之可以直接通过微机来进行底片的判读和处理。

在本试验系统中,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,采用了光电二级管来记录闪光灯的闪光过程。这样可以同时得到闪光记录和加速度记录,如图2所示。由于相机是等待式的,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,因而每一幅照片的时间都可以准确地对应到加速度记录上去。

碰撞过程中的力—时间曲线用一个固定在落重锤顶部的 Bruel and Kjaer 4344 型加速度计来记录。为避免在记录中产生振荡,加速度计与落重之间必须牢固连接。由于系统本身的复杂性,实验中采集到的信号常常由于额外的振动产生的噪音而失真。不过这些噪音固有频率较高,可以通过信号处理来消除掉。为此在本系统中,我们对瞬态应力脉冲信号进行了高频截断滤波。在没有样品时,测到系统的信号主要在30kHz以上,因此30kHz被选为滤波器的高频极限。滤波后信号的上升时间得到很大的改善,屈服点也可以清楚地确定。图2所示的是一个典型的信号在滤波前和滤波后的性态的对比。

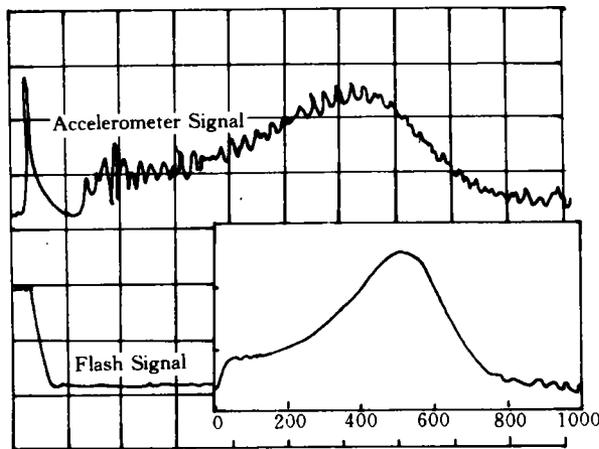


图2 加速度计和闪光信号记录。时间基为200 μ s/格。插入的小框为处理后的结果(任意尺度)。

2 系统标定

在该试验系统中,为得到准确的记录,需要对一些参数进行标定。这些参数主要有时

间,加速度和位移。

时间标定:由于加速度计安装在落重的顶部,它的记录时间与碰撞的实际时间之间还有由于应力波沿落重传播而产生的时间差。为确定这一时间差,可以用一安装有应变计的钢样品,同时记录应变计的输出和加速度计的输出。这两个输出的起始时间差就是所要的时间差。本系统中,测量到的这一时间差为 $24\mu\text{s}$ 。这一结果与基于应力波在钢中传播速度的理论预估相一致。

加速度计的标定:我们使用的加速度计是 Bruel and Kjaer 4343 型加速度计,该加速度计对于冲击加速度小于 7500g 的范围均给出线性输出。原加速度计中有标定系数,但因使用范围和固定方式的不同,故我们还是用一标准震源对其重新进行标定。该标准震源能提供精确单轴正弦运动。对此振动,我们用加速度计通过一个 1606 型 Bruel and Kjaer 振动前置放大器来记录。用记录结果与标准振动的输出相比较即得到相应的系统数。对 $lg(9.8\text{m/s}^2)$ 的加速度,加速度计的输出为 21.2mV 。

位移标定:在这套系统中,径向位移是直接从照相底片中测量的。系统本身不需要对位移进行标定。但是由于每次聚焦的位置可能有所不同,底片判读时的放大倍数也不一样,故在数据处理时我们必须找到准确的放大倍数。为此,在每次试验中,必须记录几幅样品的静态图象。因为样品的静态半径是已知的,所以由静态图象可以得到较为准确的实际放大倍数。

3 结论和讨论

本文描述的系统是为研究聚合物在 $20\text{C}\sim 200\text{C}$ 的温度范围内的应力应变关系而建立的。利用这一系统我们对两种聚合物 PEK (polyetherketone) 和 PEEK (polyetheretherketone) 的力学行为进行了较详细的研究。图 3 和图 4 给出在室温下利用本文介绍的系统测到的 PEEK 和 PEK 的典型应力—应变曲线。通过改变落重高度和样品厚度,应变率的范围可在 10^2 到 10^3 之间变化。精确的应变率可从应变与时间的关系中得到。图 5 给出一次实验中得到的应变—时间关系。从图 5 中可看出,整个实验过程基本是处于常应变率下的。对这些材料的动态力学性质的详细研究和讨论已另文发表^[4]。

本系统的主要优点在于可以测量动态泊松比。目前,其它高应变率压缩实验系统在数据处理中都假定泊松比为 0.5。图 6 给出一 PEK 样品径向应变和轴向应变的关系。从图中可以看到,在变形开始时,其斜率(泊松比)连续增加直到在 ϵ_r 约为 0.15 时达到 0.5。从我们的实验中发现,当轴向应变大于 0.10 时,泊松比约为 0.46—0.5,但在低应变时,泊松比要小一些。所以,对聚合物材料,在高应变实验中假设变形过程中体积不变是可以的。但在应变小于 0.10 时以及在所有实验的初始阶段,体积守恒的假设可能导致对实验结果分析的误导。利用本系统对动态泊松比的估算可以用来帮助分析传统系统得到的数据,从而得到更精确的应力—应变关系。

4 结论:

本文介绍的落重—高速摄影系统提供了记录材料在高应变率下力学性质的一种有价值的方法。通过这一系统,可以在测量应力的同时直接观测材料的非均匀变形、断裂和脆

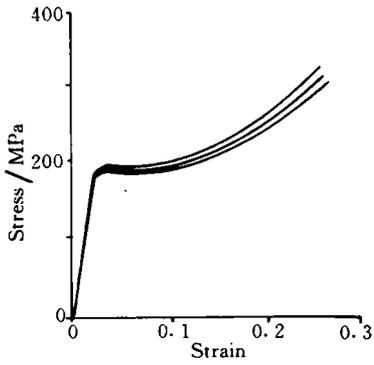


图3 PEEK 的真应力—应变曲线。图中3条曲线为对3个相似样品在相同应变率下重复测量结果。

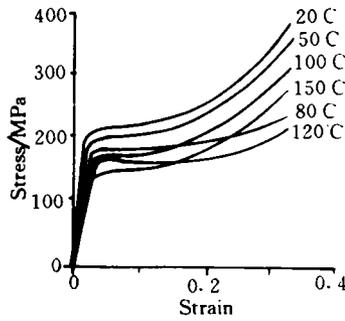


图4 PEK 的真应力—应变曲线。图中的曲线为在同一应变率下不同温度(如图中所标注)下的测量结果。

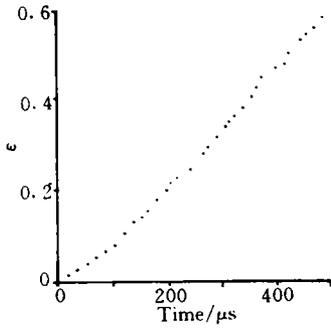


图5 典型的应变—时间关系。图中结果表明应变率基本为常数(图中曲线来自于对PEEK样品的实验)。

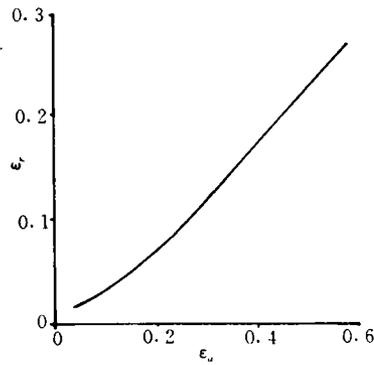


图6 典型的径向应变与轴向应变的关系。从此关系中可以确定变形过程中的泊松比(图中曲线来自于对PEK样品的实验)

性失效等现象,从而可以对应力数据进行比较合理的解释。这是目前其它高应变率材料性能测试方法所不能提供的。此外,利用本系统我们还可以检查样品是否发生了鼓形变形,以及检验在什么范围内泊松比 $=0.5$ 的假设成立。

参 考 文 献

- 1 Lindholm U S. Techniques in Metals Research V5, Part 1E, edited by Bunshah R. F., Interscience, New York, 1971
- 2 Gorham D D, Pope P H and Field J E. An improved method for compressive stress—strain measurements at very high Proc. Roy. Soc. London, ,1992, A 438
- 3 Field J E, Mechanical Properties at High rate of Strain. Institute of Physics Conference, Serial No. 70, 1984, 381—388
- 4 Hamdan S, and Swallowe G M. J. Mat. Sci. ,1996, 31, 1415

(责任编辑 石少平)