

文章编号: 1001-4888(2014)06-667-09

应力平衡和接触状态在 Hopkinson 杆 测试聚合物动态弹性模量中的影响研究^{*}

苗应刚, 李玉龙, 邓琼, 胡海涛, 赵峰, 索涛

(西北工业大学 航空学院, 陕西西安 710072)

摘要: 针对用 Hopkinson 杆试验能否准确测量聚合物动态弹性模量以及其中主要影响因素的问题, 本文基于重构试样初始加载阶段的应力波反射透射过程, 分别计算了 6 个特征时间内的前三次反射波和透射波, 得到试样的应力平衡度和试样的应力应变曲线。对于所研究的聚合物材料, 通过比较重构的应力应变曲线的弹性模量与输入的材料弹性模量, 发现在 4 个特征时间后, 误差仅在 3% 左右。因此试样变形过程中的应力平衡与否不是材料在 Hopkinson 杆试验中弹性模量测不准的原因。通过环氧树脂试样试验发现, 根据 Hopkinson 杆理论计算的应变结果要大于试样上应变片实测的结果, 误差在 11% 左右。相应的数值模拟研究发现: 试样和杆子端面接触状态直接决定着试样弹性模量测量的精度。关于惯性效应和压痕效应的研究也证实它们的影响是可以忽略的。

关键词: Hopkinson 杆; 动态弹性模量; 应力平衡; 接触状态; 聚合物

中图分类号: O347.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-14-074

0 引言

高分子聚合物材料, 由于其特有的性能, 比如较高的比强度等, 在工业中被广泛地应用, 尤其是在航空航天汽车等行业。为了更高效、更安全地设计相应的结构, 聚合物的力学性能也越来越受到学术界和工业界的广泛关注, 尤其在冲击载荷下的动态力学性能对于设计者来说更是至关重要^[1-3]。另外, 聚合物材料大多是应变率敏感的, 准确测量它在不同加载率下的力学性能, 对于理解材料的变形机理、结构优化设计和力学响应的精确分析等都具有重要的意义。

在材料高应变率下力学性能的研究中, 霍普金森压杆技术 (Split Hopkinson Pressure Bar Technique 简称 SHPB)^[4] 是一种应用最广泛的方法。它在动态载荷作用下材料本构和响应的测量上, 起着举足轻重的作用^[5,6]。然而弹性模量, 作为一个最基础的材料力学参数, 能否用 SHPB 来测量, 由于研究的材料不同, 结果也不同。毛勇建等^[7]开展了对金属试样经受 Hopkinson 杆加载过程的重构和试验研究, 结果认为用经典 SHPB 测得的弹性模量是不可靠的。Song 等^[8]通过改变试样与杆端的摩擦状态研究了 Al_2O_3 增强环氧树脂的动态力学性能, 发现摩擦对该材料高应变率下的弹性模量几乎没有影响。然而用 SHPB 能否足够精确地测量聚合物材料的动态弹性模量, 至今还没有统一的答案。这是因为 SHPB 的加载过程涉及的因素较多, 比如在加载初始阶段试样经受的应力不平衡^[9-12]、数据处理方法的选择^[13]和试样对杆端的压痕作用^[14]等都有可能对小应变下力学性能测试的精度产生影响。而且

^{*} 收稿日期: 2014-04-18; 修订日期: 2014-05-29

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11272267, 11102168 和 10932008) 和 111 项目 (No. B07050) 资助

通讯作者: 索涛 (1979—), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 冲击动力学, 实验固体力学。E-mail: suotao@nwpu.edu.cn

这些因素耦合作用在一起,较难厘清每个因素的影响。

在试样的加载中,试样与入射杆的接触端最先受力变形,随着应力波传播,应力波前沿在试样中来回反射多次^[10],最终实现试样的应力平衡和均匀变形。然而,大多数情况,在应力不平衡的这段时间内,试样变形还是在弹性阶段。由于在初始加载过程中,试样的变形耦合了应力不平衡、数据处理和压痕效应^[14]等诸多因素,由 SHPB 试验计算出的这段曲线,大都认为是不够准确的。其切线模量能否作为材料在所加载应变率下的弹性模量,至今还没有共识。

根据一维应力波理论,试样变形过程中的应力应变可以由入射杆和透射杆上测到的反射波和透射波信号求得,具体公式如下,详细的推导过程可以参考文献^[15]。

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}(t) = -\frac{2c_B}{l_s}\epsilon_r \\ \epsilon(t) = -\frac{2c_B}{l_s}\int_0^t \epsilon_r dt \\ \sigma(t) = \frac{E_B A_B}{A_s}\epsilon_t \end{cases} \quad (1)$$

由公式(1)可以发现,试样变形的应变和应变率完全由反射波决定,应力则由透射信号计算得来。这组数据处理公式由于分别只用一列波计算相应的应变和应力,在实际的数据处理中,较为简单。这样就避免了三波法^[13]中的入射波、反射波和透射波的相对起始点较难精确确定的问题。由于公式引入了应力平衡假设,由它计算出的应力应变曲线在小应变部分的准确性还值得商榷。然而这其中的误差有多大,至今还没有一个定量的结论。总之 SHPB 试验中弹性模量很难精确测量是否是由应力不平衡导致的,或是有其他因素,还没有文献对此进行研究。

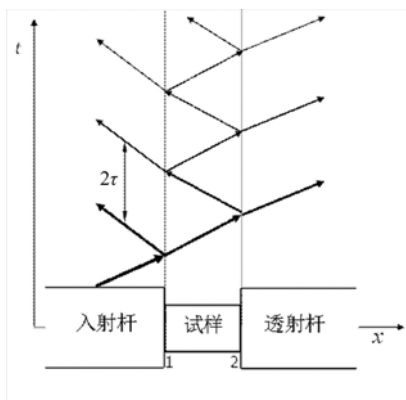


图 1 应力波加载试样过程

Fig. 1 Actual loading process of stress wave in sandwiched specimen

本文着重于研究应力不平衡阶段变形的影响,采用应力波加载试样过程的重构方法,应用一维弹性应力波理论,对于斜坡加载的入射波,根据试样和杆的波阻抗的比值^[7]分别计算出每次反射透射后的应力波^[16],通过弹性应力波的叠加原理,推导计算出试样的应力平衡度和相对应的应力应变曲线,从而对应力平衡影响大小的定量分析。最后基于 Abaqus 软件的数值模拟进一步分析了影响弹性模量测量精度的其他原因。

1 应力平衡分析

1.1 加载过程重构

如图 1 所示,当入射波到达试样与入射杆接触面 1 的时候,由于杆和试样的波阻抗不匹配^[15],首先第一次反射波产生,其余的透射进入试样,开始继续往前传播并加载试样。到达接触面 2 的时候,一部分反射回试样,其余的透射进入透射杆,从而第一次透射波产生。反射进入试样的波往接触面 1 传播,在接触面 1,一部分透射进入入射杆,形成第二次反射波,其余的再次反射进入试样。如此循环,实现试样的应力波加载。

本文考察了不同类型的聚合物材料,其参数见表 1(各数值单位为国际单位),即弹性模量分别为 10GPa、1GPa 和 1MPa 的三种材料,基本涵盖了从尼龙到橡胶不同强度的聚合物。在下面的研究中,着重于弹性模量 10GPa 的试样。

为方便计算和表示,定义特征时间 $\tau = L/C_s$,其中 L 是试样的长度, C_s 为试样材料的弹性波速。图 2 显示了在一系列线性斜坡加载(即入射波)作用下,第一、第二和第三次反射波(R1、R2 和 R3)及透射波(T1、T2 和 T3)的产生时间间隔和幅值大小。各反射波和透射波的属性与大小由一维弹性应力波理论计算得出^[16]。其中第一次反射波 R1 是拉伸波,其幅值较大,比入射波略小,这主要是由试样的波阻抗和杆子的波阻抗差别较大导致的^[16]。 2τ 之后产生的 R2 和 4τ 后产生的 R3 都是压缩应力波,幅值

逐渐减小。透射波 T1、T2 和 T3 都是压缩波,其幅值逐渐降低。通过这些应力波在试样两端截面 1 和 2 处叠加,就可以得出截面 1 和 2 的总反射波和透射波,相应的计算结果展示在图 3。图 3 中主图为加载 3 τ 时间的局部放大,右下插图 6 τ 时间内的波形全图。

表 1 Hopkinson 杆和试样的尺寸及物理参数(单位为对应的国际单位)

Tab.1 Size and mechanical parameters of Hopkinson bar and specimens involved

	Hopkinson 杆	试样		
		E-10G	E-1G	E-1M
直径	0.015	0.0088	0.0088	0.0088
长度	1.500	0.0088	0.0088	0.0088
弹性模量	7.13×10^{10}	1×10^{10}	1×10^{10}	1×10^{10}
密度	2774	1200	1200	1000
波速	5070	2887	912.9	31.62
波阻抗	421909	60968	19280	557

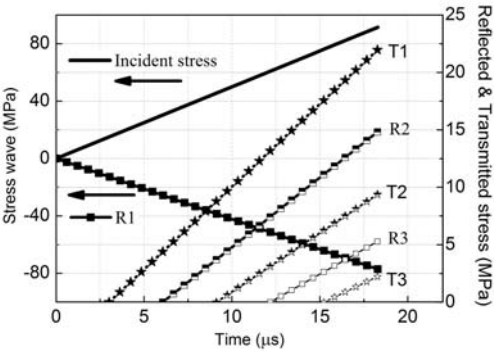


图 2 斜坡加载应力波、前三次反射波和透射波
Fig.2 Ramp loading wave and generated reflected and transmitted waves

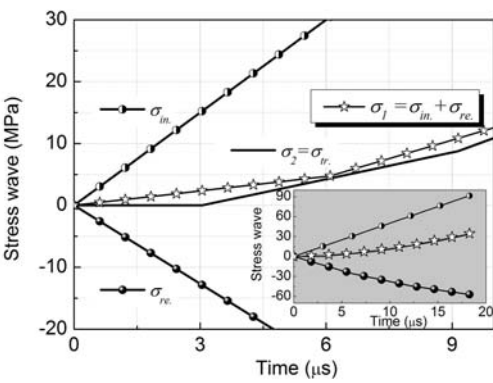


图 3 反射波、透射波以及加载过程中应力平衡度的时程曲线
Fig.3 Reflected and transmitted wave and stress equilibrium ratio curves

由入射波和反射波叠加,可以得到截面 1 处的应力 σ_1 。截面 2 处的应力就是透射应力(记为 σ_2)。如图 3 中所示,比较 σ_1 和 σ_2 可以发现,透射信号的产生时间迟滞于反射波一个特征时间 τ ,在这段时间内,试样的变形处于严重的不均匀变形阶段。随着应力波在试样截面处的反射透射,试样中的应力趋于一致,细节见图 4。

1.2 应力平衡历程

为方便分析应力不平衡的影响,应力不平衡度 $R(t)^{[10]}$ 定义为:

$$R(t) = \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{(\sigma_1 + \sigma_2)/2} \quad (2)$$

当 $R(t)$ 小于 5% 时,认为试样变形处于应力平衡阶段^[10]。如图 4 所示,分别计算了 E-10G、E-1G 和 E-1M 三种试样在斜坡加载下的响应,通过计算每一级的反射波和透射波,叠加得出试样两端面处的应力,从而得到应力不平衡度曲线,如图 4。

图 4 中,在第一个特征时间 τ 内,试样经历了最严重的不均匀变形:试样一端受力变形,另外一端还静止不变形。当第一次透射波产生后,应力不均匀度开始降低。随着应力波在试样内多次的反射透射,试样内的应力趋于均匀。但是在 2τ 和 4τ 内,应力不平衡度仍然大部分大于 5%。在稍后的 2τ 时间内,虽然大部分在 5% 以下,但是试样的变形仍没有完全达到均匀变形的限度 5%。另外,对比 E-10G、E-1G 和 E-1M 试样的应力平衡度发现:随着试样波阻抗的降低,应力不平衡度也逐渐降低。但是降低量

有限,从 E-10G 试样到 E-1M 试样,波阻抗降低了 108.5 倍,应力不平衡度也最大降低了 5% 左右(在 2τ 处)。

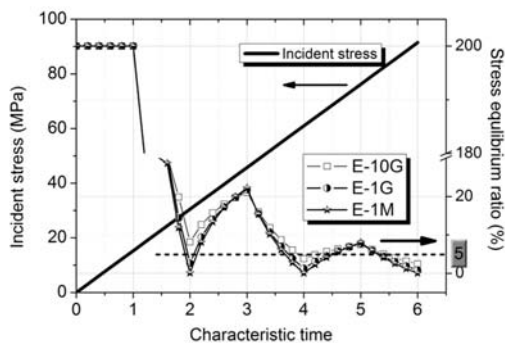


图 4 斜坡加载下的应力不平衡度曲线

Fig. 4 Stress equilibrium ratio curves under ramp loading incident wave

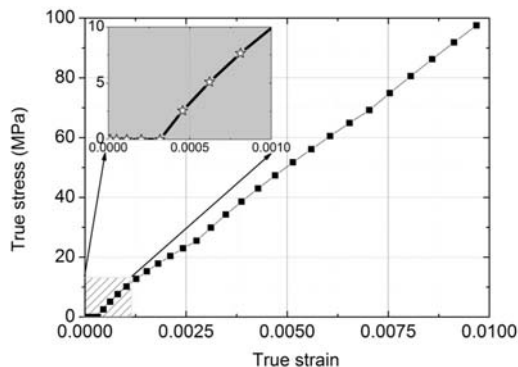


图 5 重构的应力应变曲线

Fig. 5 Reconstructed stress-strain curve

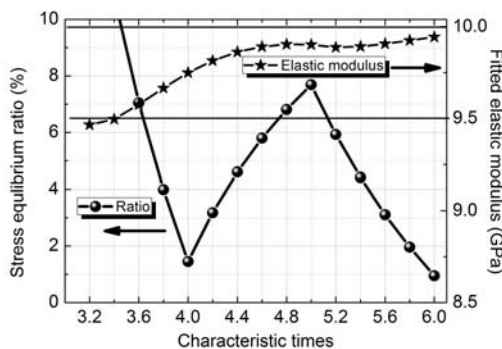


图 6 拟合的弹性模量随应力不平衡度的变化

Fig. 6 Trend of fitted elastic modulus with stress equilibrium ratio

1.3 弹性模量重构

根据公式(1),计算了在斜坡加载下 6τ 时间内, E-10G 试样的应力应变曲线, 结果见图 5。在应力应变曲线的初始段, 可以发现, 对应的真实应力是 0。左上方的局部放大图更好地显示了这一特征。这是由于在初始加载 1τ 时间内, 试样经历了严重的应力不均匀变形。在这段时间内, 反射信号正常, 但是透射信号还没有产生。最终透射信号迟滞于反射信号 1 个特征时间 τ 。随着加载的继续, 应变逐渐增大, 这段极不均匀的变形对整个曲线的线性度影响逐渐减小。在应力应变曲线的线性拟合中, 起始点从坐标原点 (0, 0) 开始, 终止点因研究情况不同而不同。在本节的研究中,

分别以不同特征时间点所对应的应变为终止点, 研究应力不平衡度对重构的弹性模量的影响。在后面的试验和数值模拟研究中, 终止点统一选为真实应变为 1% 所对应的点。通过拟合不同加载时间内的应力应变曲线, 得到相应的斜率, 同输入的弹性模量 10GPa 比较, 就可以发现应力不平衡度对弹性模量的影响大小, 详细结果见图 6。

相对应的应力平衡度曲线也显示在图 6。对于弹性模量为 10GPa 的试样, 即使在应力平衡还没有完全实现的加载过程中, 所测弹性模量也是足够地精确, 从 3.2τ 到 4.4τ 内, 拟合的弹性模量从 9.47GPa 几乎直线上升至 9.88GP。随着加载的继续, 拟合的弹性模量平稳上升至 6τ 时的 9.96GPa。总体说来, 在 4τ 之后的加载阶段, 所计算的弹性模量和输入的弹性模量 (10GPa) 之间的误差已经是足够的小, 在 3% 之内, 足以满足工程精度要求。可见应力平衡与否不是决定弹性模量能否测量的主要因素, 在斜坡加载 4τ 之后, 拟合的结果已经足够精确。

2 实验

试验选用工业界常用的环氧树脂, 其弹性模量在准静态加载下在 2.8GPa 左右。试样的尺寸是 $\Phi 8.8\text{mm} \times 8.8\text{mm}$, 密度为 1200kg/m^3 。用螺旋测微器多次测量试样的长度, 发现试样的长度差别在 0.01mm 之内, 可以说试样的加工精度是可以保证的。试验采用的 Hopkinson 杆参数见表 1。

2.1 系统校准

为了确保试验的精度,在加载试样试验前,先进行系统的校准试验。在调好入射杆、透射杆和撞击杆的同轴心度后,把入射杆和透射杆直接贴合,发射撞击杆进行校准试验。为了更直观地比较,透射波在时间域内被往前移至与入射波起始点一致,移动的时间量由透射杆应变片和入射杆应变之间距离和杆子的波速决定。图7显示了采集的入射波和透射波波形。

由图7可以发现,透射波和反射波几乎完全重合,这说明入射波在两杆接触面处几乎完全透射进入透射杆。但是,在两波的初始段还是有些差别,这是由于入射杆和透射杆的接触面没有完全接触好,使入射波有少许量的反射回入射杆,从而导致透射信号有稍微的损失。总体来说,校准结果足以说明 Hopkinson 杆系统正常。

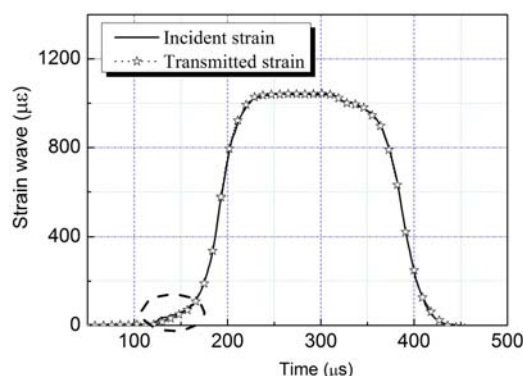


图7 Hopkinson 杆试验前校准

Fig. 7 Calibration of Hopkinson bar apparatus

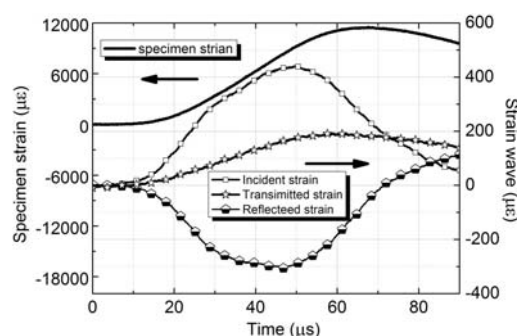


图8 Hopkinson 杆试验应变波形

Fig. 8 Strain signals from Hopkinson bar test

2.2 Hopkinson 杆实验

为实现斜坡加载,用适宜尺寸的2~3层纸片作为波形整形器,对入射波整形,实现了上升沿时间大约为 $40\mu\text{s}$ 的斜坡加载。另外,在试样上粘贴应变片,通过实时监测试样的应变变形对 SHPB 试验精度进行标定。试验的各波形如图8所示,试样上粘贴应变片的应变大小如左Y轴所示,最大应变达到 $11000\mu\epsilon$,即1.1%的应变。对于弹性应变比较大的聚合物来说,1%之内的变形还是在弹性范围内。入射波,反射波和透射波的特征见右Y轴。

应用公式(1)对试验数据进行处理,得到试样的应力应变曲线,见图9。拟合的曲线线性度比

较高, $R^2=0.9941$,拟合的斜率为 3.0109GPa 。在图右下方的插图中展示的是根据公式(1)计算出的应变和试样上粘贴应变片测得应变的比较结果。根据拟合的曲线 $y=1.112x$ 可以推算出 Hopkinson 杆试验结果的应变比实测的试样的应变要大11.2%。由于试样上粘贴的应变片记录的是试样的实时变形,能够精确地反映试样的真实应变值。可见,根据 Hopkinson 杆公式(1)解析出的应变值是偏离真实应变的,具有一定误差。因此,通过图9中的应力应变曲线所拟合的弹性模量是不准确的。

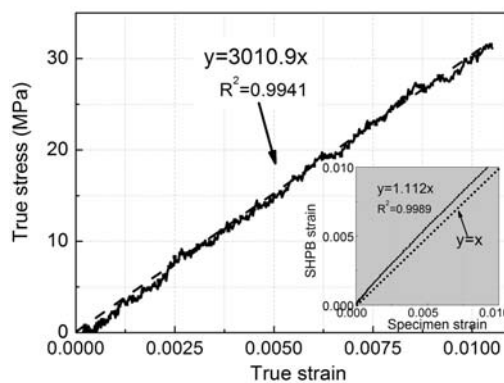


图9 Hopkinson 杆试验结果

Fig. 9 Stress-strain curve from Hopkinson bar test

3 分析与讨论

对于环氧树脂试样,测得的弹性模量在 3011MPa 左右,应力波经过 8.8mm 长的试样所需要的特征时间 τ 等于 $5.56\mu\text{s}$ 。入射波加载时间在 $40\mu\text{s}$ 左右,足以让应力波在试样中传播3个来回,亦即6个特

征时间。根据上一节的应力平衡和重构弹性模量的相关研究结果,可以得出结论:试样内的应力平衡是能达到的,而且由应力不平衡导致的误差仅在 3% 之内。因此可以说 Hopkinson 杆试验的误差不完全是由应力不平衡的影响造成的。

考虑到在 Hopkinson 杆试验加载过程的其他因素,如试样变形过程中的惯性效应,应力波在杆子中传播过程的弥散效应,抑或是试样端面与杆端面的接触状态,都是有可能影响应变的准确测量的。Chen 等^[19]对 Hopkinson 杆中应力波弥散效应进行系统分析,发现采用细长杆,通过波形整形可以极大地减少弥散效应的影响。通过对比环氧树脂试验所涉及波形和试验前的校准试验波形,可以说波形弥散效应影响是可以忽略的。

3.1 接触间隙角度影响分析

考虑到图 7 中波形初始阶段的些许不匹配,试样与杆子之间的接触状态也是能影响试验结果精度的。虽然试样和杆子的端面在加工制作过程中保证了足够的精度,但是在试样夹持的时候,保证试样和杆子之间完全的接触而没有任何间隙,还是比较难以实现的。间隙的存在势必会影响试验的精度。如图 10,左边为入射杆,右边为试样,入射杆和试样因为没有完全贴好,而存在夹角。具体过程分析如下:当在接触面处有少许间隙时,由于试样与杆子的接触面积远小于试样的截面积,导致与杆端面实际的波阻抗大大减小,则第一次反射波 R1 的幅值将大于理论值。根据公式(1)中的应变计算公式,试样的应变和反射波信号的幅值成正比。过大的反射波必然导致 Hopkinson 杆试验计算应变偏大。随着应力波的继续加载,试样的变形最终使试样和杆端面接触紧密。



图 10 不完全接触的试样和杆端面示意图

Fig. 10 Schematic map of poor contacted sections from Abaqus simulation

为了验证间隙对试验结果的影响,通过 Abaqus 软件模拟试验过程,建立了入射杆、试样和透射波的 1/4 轴对称模型,并施加对称边界条件,试样和杆子的力学参数和尺寸见表 1。通过改变入射杆和试样的接触角度实现试样和杆子接触状态的变化,分别模拟了在同一应力波加载下入射杆和试样之间间隙角度为 0° 、 0.05° 、 0.1° 、 0.3° 、 0.7° 、 1° 、 2° 和 3° 的状态。通过在入射杆撞击端面施加三角压缩波进行

加载。图 11 展示了接触间隙角度为 0° 时的应变波形。

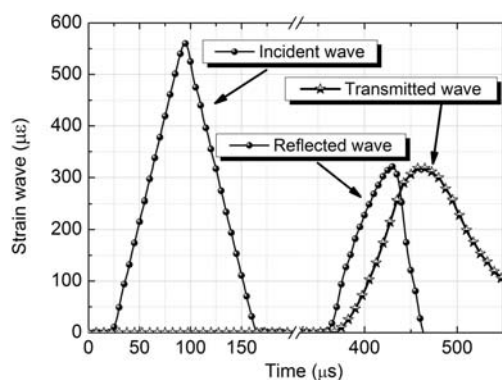


图 11 典型的数值模拟应变波形

Fig. 11 Typical strain waves of Hopkinson bar simulation

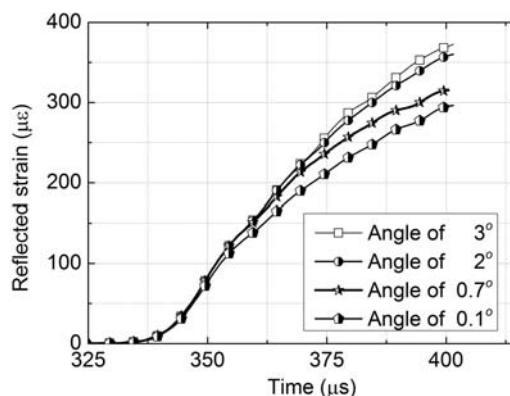


图 12 不同接触间隙角对反射波应变信号大小的影响

Fig. 12 Comparison of reflected strain waves due to various contacting angles

改变接触间隙角度大小,模拟所产生的反射波波形见图 12,可以发现,随着角度的增大,反射波幅值愈来愈大。根据公式(1)中的应变计算公式,可以推测随着角度的增大,根据公式(1)计算的试样变形应变逐渐增大。由于间隙的存在,试样的变形不是严格的均匀单轴压缩受力状态,同时也会对透射波引入误差,最终导致试样在小应变情况下引入误差,对试验结果中的弹性模量确定造成负面影响。为量化考察间隙对弹性模量确定的影响,分别通过公式(1)计算出试样的应力应变曲线,通过线性拟合得到

试样在 1% 之内的变形的斜率, 即拟合的弹性模量。图 13 展示了拟合弹性模量随接触间隙角度的变化趋势。

图 13 显示, 随着角度的增加, 弹性模量呈幂指数下降趋势。试样和杆子完美接触的情况, 拟合的弹性模量值是 2875.7 MPa, 比输入的弹性模量 3000 MPa 偏小 4% 左右, 具体的原因稍后分析。当接触角度在 0.005° 和 0.01° 时, 计算拟合的弹性模量分别为 2785 MPa 和 2692 MPa, 误差分别是 7.2% 和 10.3%。可见间隙的影响是比较严重的。在试验中, 尽可能提高试样的加工精度, Hopkinson 杆端面的平行度和垂直度是必须的。在实际的试验过程中, 为保证弹性模量的测试精度, 尽可能地实现试样和杆子端面的完全接触是非常值得的。总之, 杆和试样接触状态的好坏直接决定着弹性模量测试试验的精度。

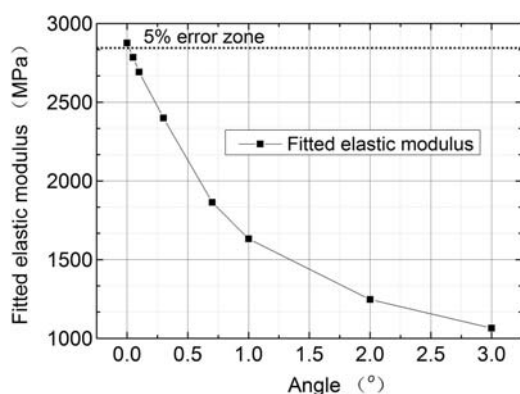


图 13 拟合弹性模量随间隙角度的变化趋势

Fig. 13 Trends of fitted elastic modulus with contacting angles

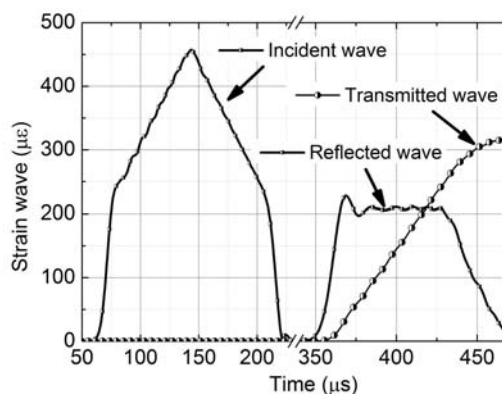


图 14 恒应变率加载模拟

Fig. 14 Strain waves from Abaqus simulation on constant strain rate tests

3.2 惯性效应和压痕效应分析

Kolsky^[4]对材料在高加载率下变形的惯性效应进行了研究, 发现在恒定应变率加载下, 试样的惯性效应就降低到可以忽略的程度, 随后的研究对惯性效应进一步分析, 也发现恒定应变率加载可以极大的降低惯性效应的影响, 尤其是对于超低阻抗材料试验^[17,18]。在数值模拟中, 通过设计双线性入射波加载, 实现了试样恒应变率加载, 具体的应变波形见图 14。

反射波在大部分加载阶段呈一平台, 根据公式(1)的应变率计算公式可以发现, 试样变形过程中实现了恒应变率加载。通过计算试样的应力应变曲线得到该次模拟结果中的拟合弹性模量为 2926.7 MPa。这和图 11 中所对应的完全接触的模拟结果 2875.7 MPa 比较接近, 相对于 3000 MPa 的输入弹性模量, 比较发现相应的误差分别为: 2.44% 和 4.14%, 误差都在 5% 之内, 这在工程试验中是满足精度要求的。对于这次恒应变率加载试验, 可以认为试验结果中的惯性效应成分极少^[17,18]。对于图 11 中的斜坡加载模拟, 发现反射波逐渐上升, 可见应变率是不恒定的, 所得到的应力应变曲线中包含了一定的惯性效应, 但是发现这两次模拟结果中弹性模量相差较小。可见, 惯性效应对于本文所研究材料的影响较小, 不是影响弹性模量测量精度的主要原因。

对试样材料和杆子材料的刚度相近的试验, 压痕现象比较严重^[13], 容易造成杆端面的凹陷现象, 这必然会影响杆端面应力波的传播, 而且造成试样受力状态的不均匀。总之压痕现象会对试验结果造成误差, 尤其是小变形情况。试样和杆子截面积的比值、弹性模量比值是主要的影响因素。在数值分析中试样尺寸选为 $\Phi 14 \times 8.8 \text{ mm}$, 加载入射波波形见图 11, 研究对于弹性模量比为 3 : 71.3 (试样和杆子的输入弹性模量分别为 3 GPa 和 71.3 GPa) 的试验条件下的压痕效应。数值模拟后得到拟合的弹性模量为 2958.3 MPa, 这相对于 3000 MPa 的输入弹性模量, 相应的误差为 1.39%。对比直径 8.8 mm 的试样和直径 14 mm (非常接近杆径 15 mm) 的试样的拟合结果, 弹性模量分别为 2875.7 MPa 和 2958.3 MPa, 可以推断, 对于所研究的材料, 由于压痕现象造成的试验误差是可以忽略的, 这主要取决于试样和杆子的

弹性模量差别较大的缘故。另外还可以推测出:当试样的截面积进一步的增加,所拟合的弹性模量会更接近输入的弹性模量(3000MPa)。这就解释了图 13 中试样和杆子完美接触(间隙角为 0°)的情况下,拟合的弹性模量值为 2875.7MPa,偏小 4% 的原因。

4 结 论

本文基于重构 Hopkinson 杆试验的加载试样过程,分别计算了 6 个特征时间内的试样应力平衡度和试样的应力应变曲线。比较发现:即使试样在变形过程中存在着应力不平衡,根据公式(1)计算的弹性模量也是足够精确的。尤其是在 4 个特征时间后,误差仅在 3% 之内。即试样变形过程中的应力平衡与否不是 Hopkinson 杆试验弹性模量测不准的主要原因。

通过对接触间隙角影响的数值分析,发现试样和杆子端面接触状态直接决定着聚合物材料弹性模量测量的精度。所计算的弹性模量随接触间隙角度的增加呈幂指数偏离真实值。

数值模拟结果也证实,压痕作用对试验结果是有影响的。但是对于聚合物材料,由于弹性模量和 Hopkinson 杆材的弹性模量差别较大,压痕效应不显著,不是影响弹性模量测量精度的主要原因。同样,对惯性效应的影响分析发现它的影响是可以忽略的。

参考文献:

- [1] 谢中秋,张蓬蓬. PMMA 材料的动态压缩力学特性及应变率相关本构模型研究[J]. 实验力学, 2013, 28(2):220—226 (XIE Zhong-qiu, ZHANG Peng-peng. On the dynamic compressive mechanical properties and strain rate related constitutive model of PMMA material [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(2):220—226 (in Chinese))
- [2] 言克斌,黄正祥,刘荣忠,姜锡权,祖旭东. 温度对高应变率下三元三乙丙橡胶力学性能影响的实验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(6):684—688 (YAN Ke-bin, HUANG Zheng-xiang, LIU Xue-zhong, JIANG Xi-quan, ZHU Xu-dong. Experimental investigation on the effect of temperature on mechanical properties of EPDM rubber at high strain rate [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(6):684—688 (in Chinese))
- [3] 索涛,李玉龙,刘元镭. 温度、应变率对航空 PMMA 压缩力学性能的影响研究[J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24(4):547—550 (SUO Tao, LI Yulong, LIU Yuanyong. Study on temperature and strain rate effects on mechanical behavior of aeronautical PMMA [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2006, 24(4):547—550 (in Chinese))
- [4] Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1949, B62:676—700.
- [5] 胡时胜. Hopkinson 压杆实验技术的应用进展[J]. 实验力学, 2005, 20(4):589—594 (HU Shi-sheng. The application development of experimental technique of Hopkinson pressure bar [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(4):589—594 (in Chinese))
- [6] 李玉龙,郭伟国,徐绯,索涛. Hopkinson 压杆技术的推广应用爆炸与冲击[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(5):385—394 (LI Yulong, GUO Weiguo, XU Fei, SUO Tao. The extended application of Hopkinson bar technique [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(5):385—394 (in Chinese))
- [7] 毛勇建,李玉龙,史飞飞. 用经典 Hopkinson 杆测试弹性模量的初步探讨[J]. 固体力学学报, 2009, 30(2):170—176 (MAO Yongjian, LI Yulong, SHI Fei-fei. A discussion on determining young's moduli by conventional split Hopkinson bar [J]. Chinese Journal of Solids Mechanics, 2009, 30(2):170—176 (in Chinese))
- [8] Song B, Chen W, Montgomery S T, Forrestal M J. Mechanical response of an alumina-filled epoxy at various strain rates [J]. Journal of Composites Materials, 2009, 43(14):1519—1536.
- [9] 周风华,王礼立,胡时胜. 高聚物 SHPB 试验中试件早期应力不均匀性的影响[J]. 实验力学, 1992, 7(1):23—29 (ZHOU Feng-hua, WANG Li-li, HU Shi-sheng. On the effect of stress nonuniformness in polymer specimen of shpb tests [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1992, 7(1): 23—29 (in Chinese))
- [10] Ravichandran G, Subhash G. Critical appraisal of limiting strain rate for compression testing of ceramics in a split Hopkinson pressure bar [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1994, 77(1):263—267.
- [11] 徐明利,张若棋,张光莹. SHPB 实验中试件内早期应力平衡分析[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(3):335—240 (XU

- Ming-li, ZHANG ruo-qi, ZHANG Guang-ying. Analysis of early stage specimen stress equilibrium in SHPB experiment[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(3):335—240 (in Chinese))
- [12] 朱珏, 胡时胜, 王礼立. SHPB 试验中粘弹性材料的应力均匀性分析[J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(4):315—322 (ZHU Jue, HU Shi-sheng, WANG Li-li. Analysis on stress uniformity of viscoelastic materials in split Hopkinson bar tests [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(4):315—322 (in Chinese))
- [13] 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 (SONG Li, HU Shi-sheng. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(4):368—373 (in Chinese))
- [14] 张祖根, 李英雷, 李英华, 陈熙盟. 压杆/试样表面接触变形对 SHPB 实验应变测量的影响[J]. *爆炸与冲击*, 2009, 11(6):573—578 (ZHANG Zu-gen, LI Ying-lei, LI Ying-hua, CHEN Xi-meng. Influences of bar/specimen contact surfaces indentation on strain measurement in SHPB experiments [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 11(6):573—578 (in Chinese))
- [15] Lindholm U S. Some experiments with split Hopkinson pressure bar[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1964, 12(3):317—335.
- [16] Wang Lili. *Foundations of stress waves*[M]. Amsterdam/Elsevier: 2007.
- [17] Gorham D A. Specimen inertia in high strain-rate compression[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1989, 22:1888—1893.
- [18] Warren T L, Forrestal M J. Comments on the effect of radial inertial in the Kolsky bar test for an incompressible material[J]. *Experimental Mechanics*, 2010, 50:1253—1255.
- [19] Chen W, Song B. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar Design, Testing and Applications*[M]. New York/Springer: 2010.

Investigation into the Influences of Stress Equilibrium and Contact State on Determining Polymer Dynamic Elastic Modulus by Hopkinson Bar

MIAO Ying-gang, LI Yu-long, DENG Qiong, HU Hai-tao, ZHAO Feng, SUO Tao

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aiming at the availability of accurately determining polymer dynamic elastic modulus through Hopkinson bar test and at its main influencing factors, a method based on reconstruction of sample's stress wave reflection and transmission process on the initial loading stage is proposed in this paper. The first three reflected and transmitted waves within 6 characteristic times were calculated to obtain specimen's stress balance and stress-strain curve. By comparing the elastic modulus from reconstructed stress-strain curve with the input elastic modulus of studied polymer material, it is found that the error is about 3% after 4 characteristic times. So, during deformation process of specimen, stress balance is not the reason for elastic modulus indeterminacy in Hopkinson bar test. However, experimental results of epoxy specimens show that the strain error from Hopkinson bar formula is larger than the results measured from strain gage on specimen up to about 11%. Corresponding numerical simulation reveals that the contact state between bar and specimen end face directly determines the measurement precision of sample elastic modulus. Study also shows that the inertial effect and indentation effect can be neglected in Hopkinson bar test.

Keywords: Hopkinson bar; dynamic elastic modulus; stress equilibrium; contact state; polymer