

文章编号: 1001-1455(2006)04-0315-08

SHPB 试验中粘弹性材料的应力均匀性分析*

朱 珏^{1,2}, 胡时胜¹, 王礼立^{2,1}

(1. 中国科学技术大学力学与机械工程系, 安徽 合肥 230026;

2. 宁波大学力学与材料科学研究中心, 浙江 宁波 315211)

摘要: 采用特征线解法, 对满足 ZWT 方程的粘弹性材料在高应变率 SHPB 试验中的应力均匀性进行了数值研究。着重分析了不同的材料本构粘性(松弛时间)、瞬态波阻抗比和入射波升时对于试样中应力均匀性、应变均匀性和平均应变率等的影响。为今后动态试验的试样设计提供了一定的理论依据。

关键词: 固体力学; 应力均匀性; 特征线解法; 粘弹性; 高应变率; SHPB

中图分类号: O347.4

国标学科代码: 130·1520

文献标志码: A

1 引 言

自 Kolsky 于 1949 年建立分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)以来, 这项基于一维波理论和应力均匀性假定的技术正在越来越广泛地运用到材料高应变率 ($10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$) 试验中^[1]。

根据一维应力假定, 可以通过直接测量弹性输入杆上的入射应变波 ϵ_i 、反射应变波 ϵ_r 和弹性输出杆上的透射应变波 ϵ_t , 再利用一维应力波理论^[2] 确定试件材料的应变率 $\dot{\epsilon}(t)$ 、应变 $\epsilon(t)$ 和应力 $\sigma(t)$ 。如果再根据应变或应力沿试件长度均匀分布假定 $\epsilon_i + \epsilon_r = \epsilon_t$, 可得

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &= -\frac{2c_0}{L_0}\epsilon_r = \frac{2c_0}{L_0}(\epsilon_i - \epsilon_t) \\ \epsilon(t) &= -\frac{2c_0}{L_0}\int_0^t \epsilon_r dt = \frac{2c_0}{L_0}\int_0^t (\epsilon_i - \epsilon_t) dt \\ \sigma(t) &= \frac{A}{A_0}E\epsilon_i = \frac{A}{A_0}E(\epsilon_i + \epsilon_r) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: 应力、应变均以压为正, E 、 c_0 和 A 分别为压杆的弹性模量、弹性波速和横截面积, A_0 、 L_0 分别为试件的初始横截面积和初始长度。可见由 ϵ_i 、 ϵ_r 和 ϵ_t 实测波形中的任两个即可确定试件的应变率 $\dot{\epsilon}(t)$ 、应变 $\epsilon(t)$ 和应力 $\sigma(t)$ 。通常测 ϵ_i 和 ϵ_t 。

随着 SHPB 越来越多地用于低波阻抗材料, 如橡胶、高聚物及混凝土等的动态性能的研究, 一方面需解决透射波信号太弱而难以准确测量的问题, 另一方面因这类试样中的波速较低, 会影响试样中应力均匀化的过程。杨黎明等^[3] 指出, 除压杆与试样的波阻抗比外, 不同入射波形(矩形、梯形及坡形)对应力均匀性也有显著影响, 但尚限于弹性试样的分析。本文中拟针对粘弹性试样, 应用特征线数值解法进一步研究试样的粘性系数、瞬态波阻抗比和不同加载升时对应力均匀性的影响。

2 特征线数值模拟的建模

试样在高应变率下的粘弹性本构行为以行之有效的朱-王-唐(ZWT)非线性粘弹性本构方程来描述^[4~7]

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

* 收稿日期: 2005-04-20; 修回日期: 2005-06-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10032010)

作者简介: 朱 珏(1979—), 女, 博士研究生。

式中:前三项描述材料的非线性弹性响应, E_0 、 a 、 b 是相应的弹性常数;两个积分项分别描述低应变率和高应变率下的粘弹性响应, E_1 、 E_2 是弹性常数, θ_1 、 θ_2 是松弛时间。通常情况下 θ_1 比 θ_2 大 5~7 个量级,所以在高应变率下低频项就简化为单一的弹性项(E_1);又因在 SHPB 试验中通常要求试样在小应变下实现应力均匀化,因而非线性弹性部分也可简化为单一的线性项(E_0),于是式(2)可简化。再联立动量方程式与连续性方程式,得如下控制方程组^[8]

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\sigma}{\theta_2} = (E_a + E_2) \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{E_a}{\theta_2} \epsilon, \quad E_a = E_0 + E_1 \quad (3a)$$

$$\rho_v \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x}, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (3b)$$

对于弹性输入杆和输出杆,只需令 $\theta_2 = \infty$, $E_a + E_2 = E$ (压杆弹性模量)即可。方程组(3)等价于三族常微分特征线方程和特征线相容关系

$$\frac{dx}{dt} = \pm \sqrt{\frac{E_a + E_2}{\rho_v}} = \pm c_v, \quad dv = \pm \frac{1}{\rho_v c_v} d\sigma \pm \frac{\sigma - E_a \epsilon}{\rho_v c_v \theta_2} dt = \pm \frac{1}{\rho_v c_v} d\sigma \pm \frac{\sigma - E_a \epsilon}{(E_a + E_2) \theta_2} dt \quad (4)$$

$$dx = 0, \quad d\epsilon - \frac{d\sigma}{E_a + E_2} - \frac{\sigma - E_a \epsilon}{(E_a + E_2) \theta_2} dt = 0 \quad (5)$$

式中:正负号分别代表右行波和左行波。这样,用特征线法解题时,经 $x-t$ 平面上任一点有三条特征线(如图 1(a)所示)。

数值模拟中重点考察试样中应力均匀化的过程,因而忽略输入杆和输出杆另一端边界条件的影响。入射加载波设为 SHPB 试验中常见的梯形波,且暂不考虑卸载部分,如图 1(b)所示。其中升时 τ_s 取为 $t_L (=L_0/c_v)$ 的整数倍,即 $\tau_s = nt_L$ (以下计算中取 $n=1, 2, 4, 10$)。并统一取试样长 $L_0 = 10$ mm。

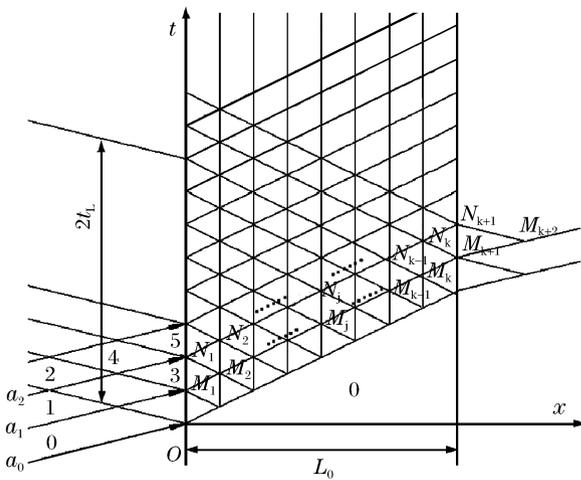


图 1(a) 粘弹性试样中波传播的特征线

Fig. 1(a) The characteristics for wave propagation in visco-elastic specimens

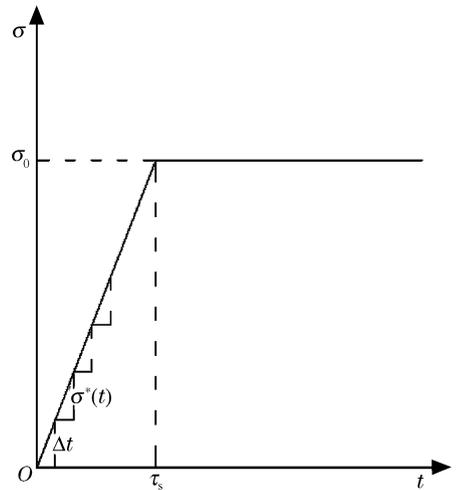


图 1(b) 入射加载波形

Fig. 1(b) The profile of incident wave in input bar

整个数值计算可归结为两类,即计算试样“边界点”和“内点”上的各力学量。对于前者,总有杆中的一条特征线和试样中的两条特征线通过该点,利用沿这些特征线的三个相容方程,再计及边界两侧的应力和质点速度相等,足以求解;对于后者,总有试样中的三条特征线通过该点,利用沿这些特征线的三个相容方程,也可以求解。其细节可参看文献[8],此处不再复述。

本文中着重考察试样的高频松弛时间 θ_2 , 加载波量纲一的升时 τ_s/t_L 和波阻抗比 R_i 等对应力均匀化的影响。 R_i 定义为杆与试样瞬态广义波阻抗比 ($R_i = \frac{A \rho_0 c_0}{A_0 \rho_v c_v}$), 为文献[3]中波阻抗比 β 的倒数。

计算中钢杆的材料参数取为: $\rho_0 = 7.8 \text{ g/cm}^3$, $E = 210 \text{ GPa}$ 。代表性粘弹性材料共取三种(见表 1): 其一是参照普通有机玻璃 PMMA 的 ZWT 参数^[9], 调整面积之比 A/A_0 使得 R_i 恰为一整数, 即 $R_i = 15$

(简称为材料 VE1);注意当 VE1 的其他参数不变而 θ_2 取为 ∞ 时,粘弹性试样就蜕化为弹性试样(简称为 EL)。其二是改变 VE1 的材料参数 θ_2 为 $9.54 \mu\text{s}$,以便考察高频松弛时间 θ_2 对应力均匀性的影响(简称为 VE2)。其三是将 VE1 的材料参数 E_0 、 E_1 和 E_2 扩大 10 倍,从而有 $R_i = 5$,以便考察波阻抗比 R_i 对粘弹性试样应力均匀性的影响(简称为 VE3)。

3 粘弹性材料的应力均匀性分析

当升时 $\tau_s/t_L = 1$ 时,VE1、VE2 和 EL 试样左、右边界上量纲一的应力 σ/σ_0 随量纲一的时间 t/t_L 的变化曲线如图 2 所示。松弛时间 θ_2 越小,应力随时间的衰减(包括每一台阶处的应力衰减)越大,说明弹性试样的应力均匀性分析并不能完全说明粘弹性试样的情况。粘弹性试样中的应力波虽然有明显衰减,但早期的应力不均匀性仍然存在。随着波在试样中的来回传播,左、右边界的应力差值才逐渐减小,逐步趋于均匀化。

取加载升时 $\tau_s/t_L = 1, 2, 10$ 时,VE1、VE2 和 EL 试样左、右边界上应力-时间曲线汇总对比如图 3 所示。可见随 τ_s/t_L 的增大,边界处加载初期的应

表 1 代表性粘弹性材料的 ZWT 参数

Table 1 The ZWT parameters of representative materials

试样	$\rho_v / (\text{g}/\text{cm}^3)$	E_0 / GPa	E_1 / GPa	E_2 / GPa	$\theta_2 / \mu\text{s}$	R_i
VE1	1.19	2.04	0.897	3.07	95.4	15
VE2	1.19	2.04	0.897	3.07	9.54	15
VE3	1.19	20.4	8.97	30.7	95.4	5
EL	1.19	2.04	0.897	3.07	∞	15

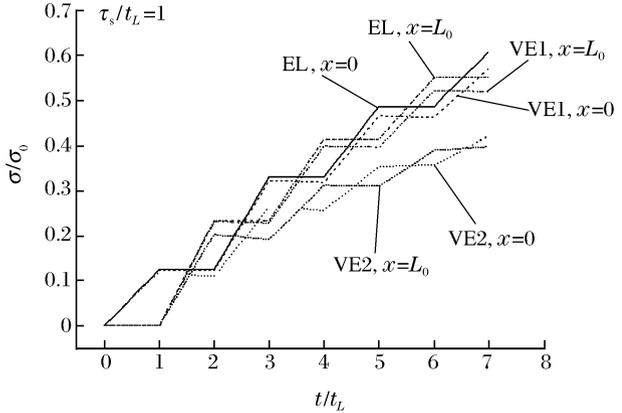


图 2 不同粘弹性材料的应力-时间曲线
Fig. 2 Dimensionless stress-time curves for different materials

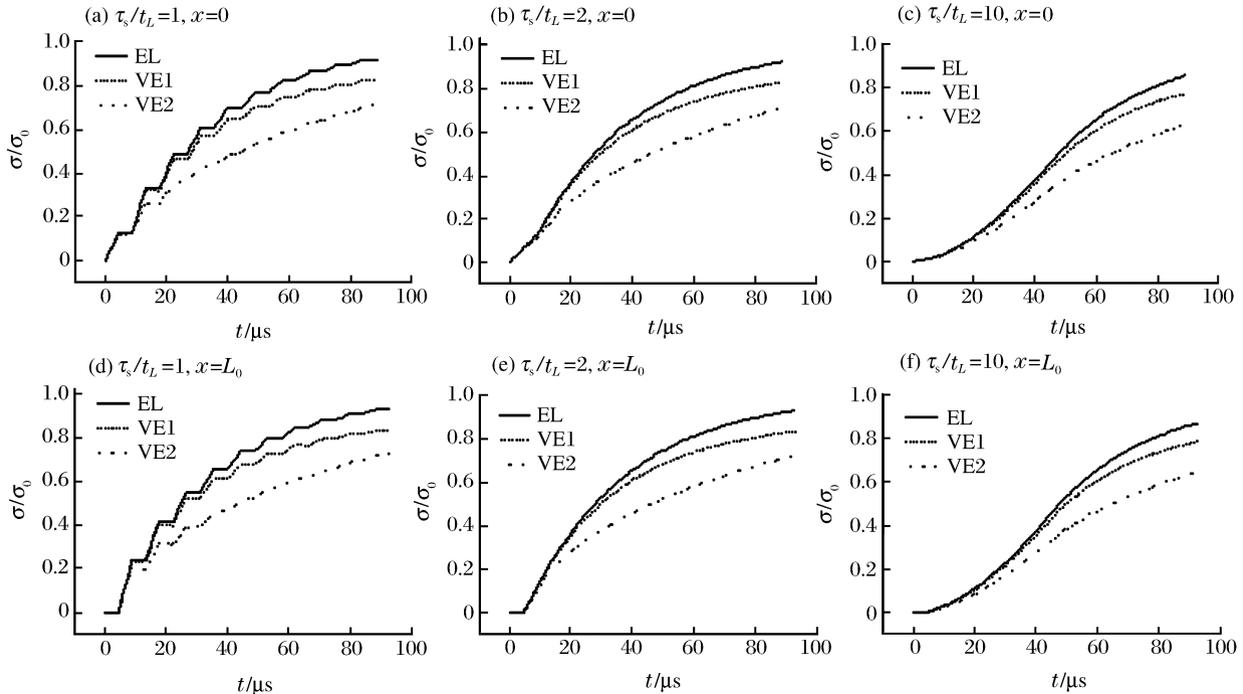


图 3 不同加载升时的应力-时间曲线

Fig. 3 Stress-time curves of specimens at different rise times

力由阶梯状上升逐渐趋于连续化上升;且应力-时间曲线也从凸型转为凹型,即应力率随着 τ_s/t_L 的增大而逐渐降低;这意味着通过“波形整形器”延长升时 τ_s ,将不可避免地以降低应力/应变率为代价。

还值得注意的是,在相同的入射波下,粘弹性试样所达到的量纲一的应力 σ/σ_0 随松弛时间 θ_2 的减小而降低。即使在 $\tau_s/t_L=1$ 的情况下,应力波在 VE1 试样中传播 20 次以后,试样中的应力也只达到 $0.83\sigma_0$ 。而随升时 τ_s/t_L 的增大则降低得更多,这正是试样的粘弹性所决定的。

为了进一步对粘弹性试样中的应力均匀化过程作定量的分析,定义在 t 时刻,左、右边界上的应力之差 $\sigma_L - \sigma_R$ 与它们的平均值之比 α_k 为应力均匀程度的度量值

$$\alpha_k = \left| \frac{\sigma_L(t) - \sigma_R(t)}{(\sigma_L(t) + \sigma_R(t))/2} \right| \tag{6}$$

设 $t \geq t_u$ 时 $\alpha_k \leq 5\%$, 认为试样应力是均匀的^[10], 则 t_u 为应力均匀化的时间,或可定义量纲一的应力均匀化时间 $\bar{t}_u = n_u = t_u/t_L$, n_u 也就是应力均匀前应力波在试样中的传播次数(非整数)。关于弹性试样当升时为 $\tau_s = 2t_L$ 时的应力均匀性,文献[3]已得出准确的数值计算公式(式中 k 是应力波沿着试样长度来回传播的次数,为整数)

$$\alpha_k = \frac{2\beta^2(1-\beta)^{k-2}}{(1+\beta)^k + (1-\beta)^{k-2}} = \frac{2(1/R_i)^2(1-1/R_i)^{k-2}}{(1+1/R_i)^k + (1-1/R_i)^{k-2}} \quad k > 2 \tag{7}$$

对于试样 VE1 和 VE2,不同升时下应力均匀性随 t/t_L 的关系如图 4 所示(图中应变率算法见第 5 节)。可见 $\tau_s = t_L$ 时应力均匀性最差,特别在波刚开始传播的阶段。而 $\tau_s = 2t_L$ 时的应力均匀性最好。随着升时增加,应力均匀性反而更差。作为比较,图中给出了弹性试样 EL 在 $\tau_s = 2t_L$ 时的计算结果。

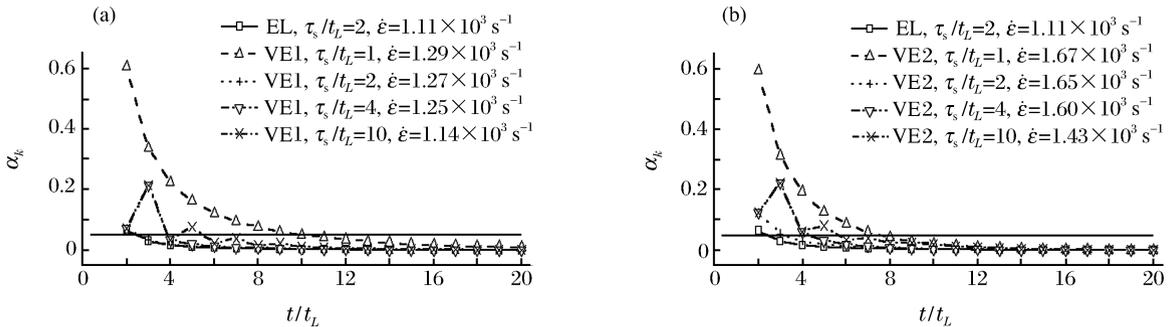


图 4 不同加载升时的应力均匀性

Fig. 4 Stress uniformity curves at different rise times

不同情况下试样的量纲一的应力均匀化时间 n_u 如表 2 所示。除 $\tau_s = t_L$ 外, n_u 随 θ_2 的减小而增大,不利于应力均匀化。但在一定的 θ_2 和 R_i 的组合下,如 VE1,则和 EL 的应力均匀性几乎完全相同。因此有必要进一步考察 R_i 对粘弹性试样应力均匀性的影响。

表 2 量纲一的应力均匀化时间 n_u

Table 2 The time required for stress uniformity

试样	$\tau_s/t_L=1$	$\tau_s/t_L=2$	$\tau_s/t_L=4$	$\tau_s/t_L=10$
EL	10.2	2.2	4.0	5.4
VE1	10.2	2.2	4.0	5.4
VE2	7.2	3.2	4.2	5.8
VE3	5.4	3.2	4.4	6.0

取试样 VE1 和 VE3,在不同升时 $\tau_s/t_L=1, 2,$

10 时计算所得应力-时间曲线见图 5。 $R_i=5$ 的试样应力-时间曲线大大高于 $R_i=15$ 的,意味着试样有较高的应力/应变率,且能达到较高的应力($R_i=5$ 的试样中应力最高可达到 $0.98\sigma_0$,而 $R_i=15$ 的只达到 $0.83\sigma_0$)。

试样 VE1 和 VE3 量纲一的应力均匀化时间 n_u 的对比见表 2。除了 $\tau_s = t_L$ 的情况外,都是 R_i 大的 VE1 试样的应力均匀性好于 R_i 小的 VE3 的应力均匀性,意味着波阻抗与弹性杆匹配的试样的均匀性反而更差。但只要加载升时适当,在一定的 θ_2 和 R_i 的组合下,试样可达到相对理想的应力均匀性。

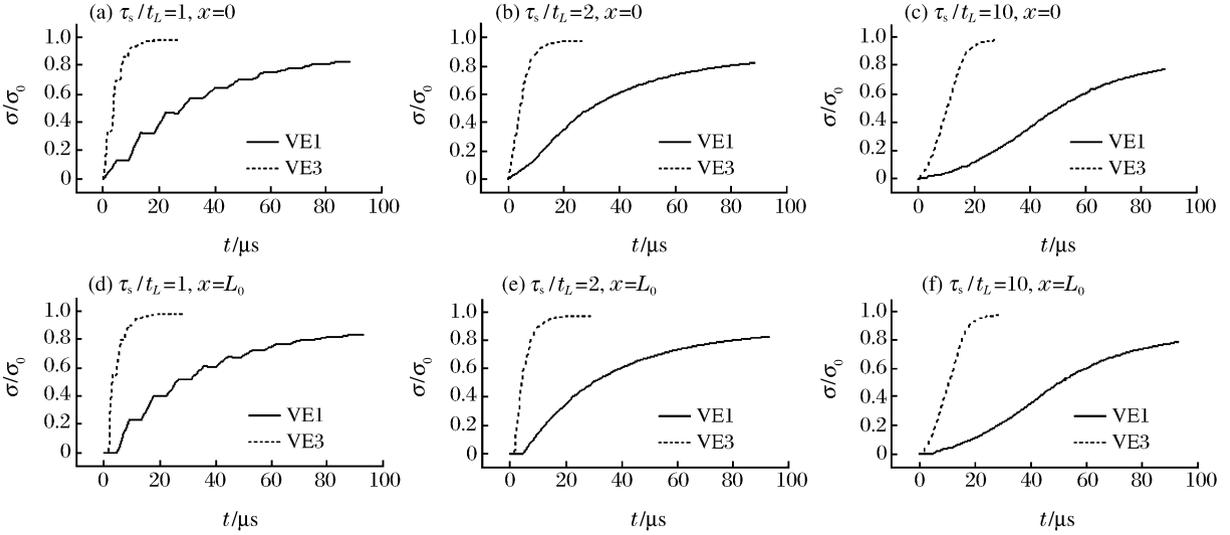


图 5 不同加载升时的应力-时间曲线

Fig. 5 Stress-time curves of specimen at different rise-times

4 粘弹性材料的应变均匀性分析

当压杆中的应力波以应变片测量时,“应力均匀性”假定实际上表现为“应变均匀性”假定(见式(1))。不同于弹性试样中应变与应力之间呈正比关系,粘弹性试样在恒速边界条件下的应力波剖面呈松弛减小特性而应变波剖面却呈蠕变增加特性^[2]。所以粘弹性试样左、右两端状态的均匀性问题不应只限于应力,还应考虑应变均匀性,以此来指导实际的试验。

在不同的升时 $\tau_s/t_L=1, 10$ 下,VE1、VE2 和 EL 试样的应变随时间的关系如图 6 所示(取 $\sigma_0=650$ MPa)。发现由于粘性项的存在,VE1 试样中的应变大于 EL 的应变,而 VE2 试样中的应变又大于 VE1 的应变。

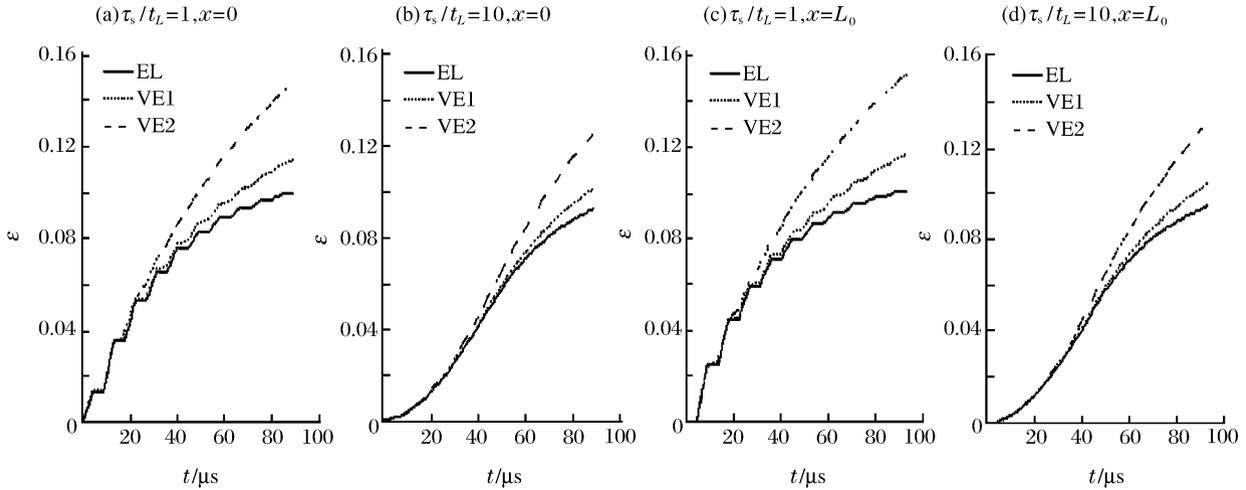


图 6 不同加载升时的应变-时间曲线

Fig. 6 Strain-time curves of specimens at different rise times

类似于式(6),由 t 时刻左、右边界上的应变差 $\epsilon_L - \epsilon_R$ 与其平均值之比 γ_k 度量应变均匀程度,设当 $\gamma_k \leq 5\%$ 时试样应变可看作是均匀的。而量纲一的应变均匀时间 n_u (非整数)可沿用第 3 节的定义

$$\gamma_k = \left| \frac{\epsilon_L(t) - \epsilon_R(t)}{(\epsilon_L(t) + \epsilon_R(t))/2} \right| \tag{8}$$

图7给出试样 VE1 和 VE2 的应变均匀性随传播时间(或次数) t/t_L 的变化。作为比较,图中还给出了弹性试样 EL 在 $\tau_s = 2t_L$ 时的计算结果。表3则给出在不同入射波升时情况下试样达到应变均匀的无量纲时间 n_u 。对比表3和表2可见:对于弹性试样 EL,如预料,其应力均匀性和应变的均匀性是一致的。但对于粘弹性试样则两者有所区别,不论是 VE1 试样还是 VE2 试样,在短升时情况下,应变较应力更易达到均匀;但随着升时增大,应变就逐渐较应力更难达到均匀了,这体现了粘弹性的松弛特性。对表3和表2中的试样 VE1 和 VE3 分别进行对比后则发现,波阻抗比 R_i 对试样应力和应变均匀性的影响不大,只有在升时足够大(如 $\tau_s = 10t_L$)时,随 R_i 的减小,应变才比应力较难达到均匀。综上所述,对于粘弹性试样应注意应力与应变均匀性的差别,并应同时满足两者的均匀性要求。

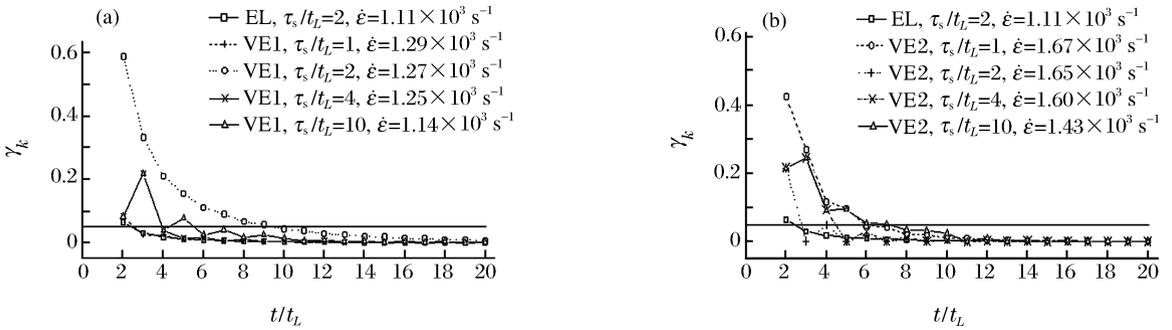


图7 不同加载升时的应变均匀性

Fig. 7 Strain uniformity curves at different rise times

5 粘弹性试样的平均应变率分析

SHPB 试验最重要的基本要求之一是要保证实现高应变率。按传统的 SHPB 技术,试样的平均应变率由左、右边界处的质点速度之差与试样长度的比值得到

$$\dot{\epsilon}_{av}(t) = \frac{v_R(t) - v_L(t)}{L_0} \quad (9)$$

数值计算中发现在达到应力均匀之前,质点速度-时间曲线(特别是中间点)有明显震荡;随升时增大,这种震荡逐渐减小。值得注意的是,应力均匀以后,当升时较小时(如 $\tau_s/t_L = 1, 2, 4$),试样左、右两端的质点速度之差随时间逐渐减小;而当升时较大时(如 $\tau_s/t_L = 10$),试样左、右两端的质点速度之差随时间逐渐增大后逐渐减小。可见式(9)还不能满意地反映试样的真实应变率的变化。

实际上,在数值计算中,试样各点的应变率也可直接由应变 $\epsilon(t)$ 对时间求导得到

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{d\epsilon(t)}{dt} \quad (10)$$

仍以 VE1 为例,试样左、右边界及中间点的应变和质点速度按公式(10)和(9)计算得到的应变率-时间曲线如图8所示。可见试样中各点的应变率随时间变化不同,按公式(9)和(10)算得的结果也不一致。随着升时增大,这种差别逐渐缩小,但应变率本身也随之减小。不过,在应力达到均匀以后,按公式(9)算得的平均应变率-时间曲线与由试样中间点按公式(10)算得的应变率-时间曲线逐渐重合。本文中各图中标注的平均应变率均为由左、右边界点和中间点的应变按公式(10)计算得的应变率的平均值。综观以上文中标注的平均应变率,不难发现,粘弹性试样的应变率实际上既依赖于材料的松弛时间 θ_2 和波阻抗 R_i ,也依赖于入射波的升时 τ_s/t_L 。即:随 θ_2 的减小,应变率增高;随 R_i 的减小,应变率增高;而随 τ_s/t_L 的增加,则应变率降低。这是在设计和实施 SHPB 试验时应予以考虑的。

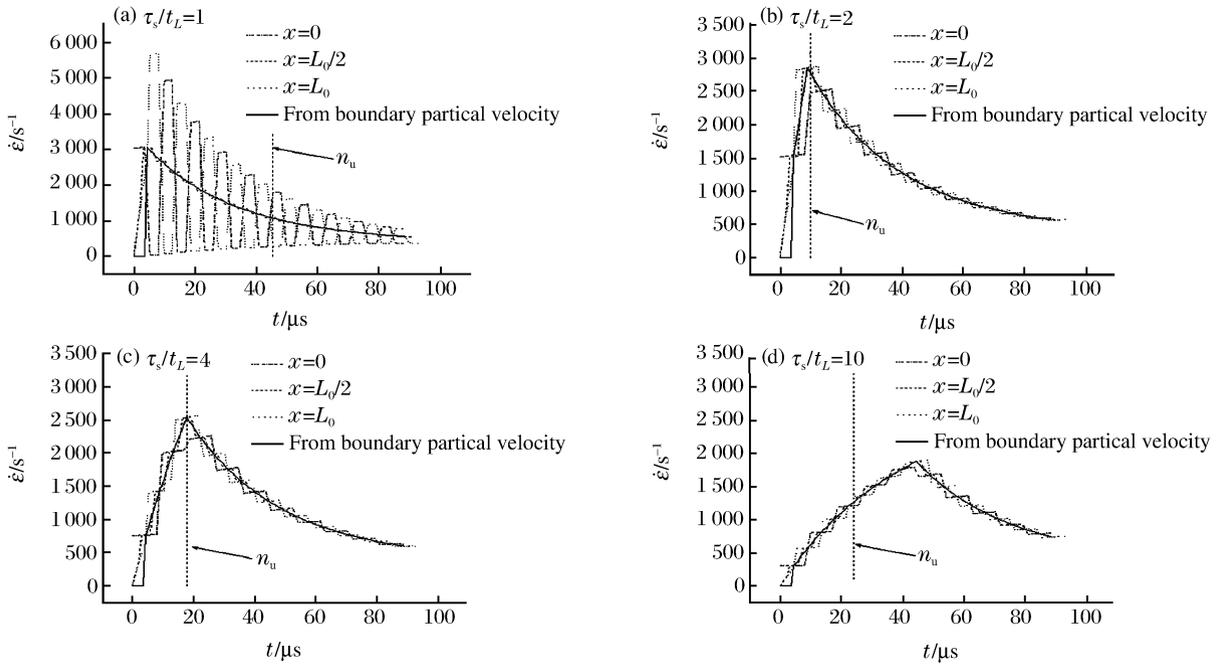


图 8 由应变和质点速度算得的不同加载升时的应变率-时间曲线

Fig.8 Strain rate-time curves calculated from strain and particle velocity at different rise times

6 结 论

(1)与弹性试样的应力均匀性分析不同,粘弹性试样的应力均匀性过程既依赖于入射波的升时 τ_s/t_L ,又依赖于材料的松弛时间 θ_2 和波阻抗比 R_i 。

(2)就升时 τ_s/t_L 的影响而言,并非升时越长,试样的应力均匀性就越好,并且随着升时增长还会降低试样的应变率。实际上在 $\tau_s/t_L=2$ 时,试样更容易实现应力均匀性。这一点是和弹性试样的应力均匀性分析结论相一致的。

(3)粘弹性试样的高频松弛时间 θ_2 越小,除了短升时(如 $\tau_s/t_L=1$)的情况外,越难达到应力均匀性,试件所达到的应力幅值也越低,但应变率却上升。

(4)随着粘弹性试样的瞬态波阻抗 R_i 减小,除了短升时(如 $\tau_s/t_L=1$)的情况外,应力均匀性变差,但应变率提高。

(5)与弹性试样不同,粘弹性试样的应变均匀性和应力均匀性有所区别。在短升时情况下,应变较应力更易达到均匀;但随着升时增大,应变则逐渐较应力更难达到均匀。除升时足够大(如 $\tau_s/t_L=10$)时,波阻抗比 R_i 对试样应力和应变均匀性的影响不大。

(6)粘弹性试样的应变率既依赖于材料的松弛时间 θ_2 和波阻抗 R_i ,也依赖于入射波的升时 τ_s/t_L ,表现为:随 θ_2 的减小,应变率增高;随 R_i 的减小,应变率增高;而随 τ_s/t_L 的增加,则应变率降低。

参考文献:

[1] Meng H, Li Q M. Correlation between the accuracy of a SHPB test and the stress uniformity based on numerical experiments[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,28(5):537-555.

[2] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社,1985.

[3] Yang L M, Shim V P W. An analysis of stress uniformity in split Hopkinson bar test specimens[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,31(2):129-150.

[4] 周风华. 有机玻璃在高应变率大变形下的非线性粘弹性及损伤破坏性能研究[D]. 安徽合肥:中国科学技术大学, 1990.

- [5] 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, 1991,12(4):333-342.
- [6] 胡时胜,王道荣. 冲击载荷下混凝土材料的动态本构关系[J]. 爆炸与冲击, 2002,22(3):242-246.
HU Shi-sheng, WANG Dao-rong. Dynamic constitutive relation of concrete under impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2002,22(3):242-246.
- [7] 王道荣,胡时胜. 冲击载荷下混凝土材料损伤演化规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003,22(2):223-226.
WANG Dao-rong, HU Shi-sheng. Study on damage evolution of concrete under impact load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(2):223-226.
- [8] WANG Li-li, Labibes K, Azari Z, et al. Generalization of split Hopkinson bar technique to use viscoelastic bars [J]. International Journal of Engineering, 1994,15:669-686.
- [9] 王礼立,施绍裘,陈江瑛,等. ZWT 非线性热粘弹性本构关系的研究与应用[J]. 宁波大学学报(理工版), 2000,13(增刊):141-149.
WANG Li-li, SHI Shao-qiu, CHEN Jiang-ying, et al. Studies on ZWT non-linear thermo-viscoelastic constitutive relation and its application[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2000,13(supple):141-149.
- [10] Ravichandran G, Subhash G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing of ceramics in a split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of American Ceramic Society, 1994,77:263-267.

Analysis on stress uniformity of viscoelastic materials in split Hopkinson bar tests

ZHU Jue^{1,2*}, HU Shi-sheng¹, WANG Li-li^{2,1}

(1. *Department of Mechanics and Mechanical Engineering,*
University of Science and Technology of China,
Hefei 230026, Anhui, China;

2. *Mechanics and Material Science Research Center, Ningbo University,*
Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: By using characteristics method of wave propagation, the SHPB tests for the so-called ZWT viscoelastic materials are numerically studied to explore how the basic assumption of uniform distribution of stress along the length of specimen can be satisfied. It is found that the material parameters such as the relaxation time θ_2 and the transient wave impedance ratio R_i , as well as the rise time of incident wave all strongly influence the stress uniformity, the strain uniformity and the average strain rate of the tested specimen. Results may provide theoretical bases for the design of a dynamic test for viscoelastic material.

Key words: solid mechanics; stress uniformity; characteristics method; viscoelastic; high strain rates; SHPB

* Corresponding author: ZHU Jue
E-mail address: zhujue@mail.ustc.edu.cn
Telephone: 0574-87600075