

文章编号: 1001-1455(2008)05-0448-07

# SHPB 试验中试件的轴向应力均匀性\*

毛勇建<sup>1,2</sup>, 李玉龙<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学航空学院, 陕西 西安 710072;

2. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 针对 SHPB 试验中试件的轴向应力均匀性问题, 采用一维弹性波理论, 推导了具有任意形状前沿的入射波加载下, 试件内应力的时空分布计算公式。以脉冲前沿的上升时间为参数, 将矩形、梯形和坡形 3 种典型的输入脉冲统一表示为梯形波的形式, 计算了不同入射波上升时间和不同试件-压杆波阻抗比情况下试件中的应力传播过程, 得到了相应的应力均匀度时程曲线以及应力平衡时间。分析了入射波上升时间和试件-压杆波阻抗比对应力平衡时间的影响, 得到了一些有意义的认识, 为 SHPB 试验的设计与分析提供了一定的理论依据。

**关键词:** 固体力学; 应力均匀性; 一维应力波理论; SHPB

**中图分类号:** O347.4

**国标学科代码:** 130·15

**文献标志码:** A

## 1 引言

分离式 Hopkinson 压杆 (Split Hopkinson pressure bar, SHPB) 技术已经广泛应用于材料在高应变率下的力学性能测试<sup>[1-2]</sup>。众所周知, SHPB 试验中有一个重要的基本假设: 试件的应力应变沿其长度方向均匀分布<sup>[3]</sup>。最初, SHPB 试验主要用于金属等波阻抗较高材料的力学性能测试。对于该类材料的 SHPB 试验, 试件的应力均匀性问题已得到深入细致的研究。结果表明, 对于金属试件, 应力平衡时间较短, 试件应力均匀性假设是可以接受的<sup>[4]</sup>。但近年来, 测试对象已经从金属材料拓展到非金属材料, 例如陶瓷、混凝土、玻璃等脆性材料, 橡胶、泡沫等软材料。对脆性材料的 SHPB 试验, 试件可能在应力达到平衡之前就发生脆性破坏; 而对软材料, 由于其波阻抗较小, 可能需要较长的时间才能达到应力平衡<sup>[5]</sup>。因此, 对于脆性材料和软材料的 SHPB 试验, 试件应力均匀性假设不一定总是合理的, 这就可能对试验结果的准确性产生较大的影响。因此, 有必要对该问题开展进一步的研究, 以便在试验中采取合理的措施克服这一困难。

针对脆性材料和软材料力学性能测试的应力均匀性问题已经得到关注<sup>[6-11]</sup>。但大多将入射波分为矩形波、梯形波和坡形波, 然后对不同入射波加载下的应力均匀性进行分析。其中对梯形波加载的研究, 一般取升时等于应力波在试件中的传播时间的整数倍<sup>[7-10]</sup>。这样, 仅根据某些特殊情况的计算结果, 就难免只能得到一些粗略的规律。

事实上, 矩形、梯形和坡形 3 种波形可以表达为统一的梯形波形式。其中, 若波形前沿的上升时间 (以下简称升时) 为零, 为矩形波; 若升时长于关心时段, 则可看作是坡形波; 升时介于上述两者之间, 则为一般意义上的梯形波。显然, 矩形、梯形、坡形 3 种波形的区别, 仅在于升时的不同。容易理解, 由于升时是可以连续变化的, 因此 3 种波形入射下的应力均匀性规律也应该是连续变化的。所以, 不同入射波形对应力均匀性的影响, 不应该仅因为输入波形的不同而出现完全不同甚至相反的规律。因此, 按照上述对 3 种波形的统一表示方法, 试件应力均匀性的变化规律, 应该和入射波升时的长短密切相关。本文中梯形入射波 (包括矩形波和坡形波) 的不同升时对试件应力均匀性的影响进行分析。

\* 收稿日期: 2007-03-19; 修回日期: 2007-12-03

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点基金项目(90405016)

作者简介: 毛勇建(1976—), 男, 博士研究生, 工程师。

## 2 试件应力的时空分布计算

### 2.1 基本假设

为简化问题,假设:(1)应力在输入杆、输出杆(统称压杆)和试件中任意截面上是均匀的,因此可以采用一维应力波理论分析;(2)输入杆和输出杆具有相同的直径和材料,因此具有相同的广义波阻抗;(3)入射应力波宽度(持续时间)大于感兴趣的时间,也即在计算过程中不考虑卸载;(4)本文中提到的应力波均为线弹性波;(5)计算中只考虑试件-压杆波阻抗比小于 1 的情况。

### 2.2 计算公式

根据一维应力波理论,应力波通过不同波阻抗的界面时,会发生反射和透射。对于矩形波入射条件下的试件应力计算公式,文献[3,7]中已有推导。而对于任意形状的应力波前沿,可以看作是一系列矩形增量脉冲的叠加<sup>[9]</sup>。因此,假设入射波  $\bar{\sigma}_1(\bar{t}')$  已完全通过输入杆-试件界面,则透射到试件的波形

$$\bar{\sigma}_T(\bar{t}') = (T_{B-S}/\alpha)\bar{\sigma}_1(\bar{t}') \tag{1}$$

式中:  $T_{B-S} = 2\beta/(1+\beta)$  为输入杆-试件界面的透射系数,  $\beta = (\rho_S C_S A_S)/(\rho_B C_B A_B)$  为试件-压杆的广义波阻抗比(以下简称相对波阻抗),  $\rho_B, C_B, A_B$  和  $\rho_S, C_S, A_S$  分别表示压杆和试件的材料密度、弹性波速和截面积,  $\tau = L_S/C_S$  为应力波从试件一端传播到另一端需要的时间,  $t'$  为时间坐标,  $\bar{t}' = t'/\tau$  为量纲一时间坐标,  $\bar{\sigma}_1(\bar{t}') = \sigma_1(t')/\sigma_A$  为量纲一入射波时程曲线,  $\sigma_A$  为输入杆中的入射波幅值,  $\alpha = A_S/A_B$  为试件-压杆的截面积比。

现考察应力波传播的相对时间  $\bar{t}$  和应力波波头相对位置  $\bar{x}'$  之间的关系,注意到

$$\bar{t} = t/\tau = C_S t/L_S = x'/L_S = \bar{x}' \tag{2}$$

式中:  $t$  为应力波传播时间,以入射波波头通过输入杆-试件界面时刻为零时;  $\bar{t}$  为应力波传播的相对时间;  $L_S$  为试件长度;  $x'$  为应力波波头位置;  $\bar{x}' = x'/L_S$  为应力波波头的量纲一坐标。式(2)的意义在于,透射波波头所在位置  $\bar{x}'$  在数值上恰好等于传播时间  $\bar{t}$ 。因此,在透射波传播时间等于  $\bar{t}$  时,空间坐标  $\bar{x} = x/L_S = 0$  处的应力  $\sigma_{TS}(\bar{x})|_{\bar{x}=0}$  在数值上等于对应时间坐标  $\bar{t}' = \bar{t}$  点的应力  $\sigma_T(\bar{t}')|_{\bar{t}'=\bar{t}}$ ,  $x$  是以输入杆-试件界面为零,指向试件另一端的坐标轴;而空间坐标  $\bar{x} = \bar{x}'$  处的透射波  $\sigma_{TS}(\bar{x})|_{\bar{x}=\bar{x}'}$ ,在数值上等于透射波波头处的应力  $\sigma_T(\bar{t}')|_{\bar{t}'=0}$ 。因此,量纲一透射波在空间坐标  $\bar{x}$  上的分布为

$$\bar{\sigma}_{TS}(\bar{x}) = \begin{cases} \bar{\sigma}_T(\bar{t} - \bar{x}) & \bar{x} \in [0, \bar{x}'] = [0, \bar{t}] \\ 0 & \bar{x} \in (\bar{x}', +\infty) = (\bar{t}, +\infty) \end{cases} \quad \bar{t} > 0 \tag{3}$$

以上未涉及透射波在试件内的来回反射。事实上,在透射波  $\bar{\sigma}_{TS}(\bar{x})$  进入试件后的  $\bar{t}$  时刻,已经在试件内来回反射  $n = \text{int}(\bar{t})$  次。此时试件内的总应力,等于原透射波及该透射波在试件-压杆界面各次反射后的反射波的线性叠加。此时试件内透射波的表达式为

$$\bar{\sigma}_0(\bar{x}) = \bar{\sigma}_{TS}(\bar{x}) \quad \bar{x} \in [0, 1] \tag{4}$$

第 1 次反射后的反射波在试件内的分布为

$$\bar{\sigma}_1(2 - \bar{x}) = F_{S-B}\bar{\sigma}_{TS}(2 - \bar{x}) \quad \bar{x} \in [1, 2] \tag{5}$$

式中:  $F_{S-B} = (1 - \beta)/(1 + \beta)$  为试件-压杆界面的反射系数。第 2 次反射后的反射波为

$$\bar{\sigma}_2(\bar{x} - 2) = F_{S-B}^2\bar{\sigma}_{TS}(\bar{x} - 2) \quad \bar{x} \in [2, 3] \tag{6}$$

依此类推,第  $n$  次反射后的透射波在试件内的分布为

$$\bar{\sigma}_n(n + 1 - \bar{x}) = \begin{cases} F_{S-B}^n\bar{\sigma}_{TS}(n + 1 - \bar{x}) & \bar{x} \in [n, \bar{t}] \\ 0 & \bar{x} \in [\bar{t}, n + 1] \end{cases} \quad \bar{t} \in [n, n + 1], n \text{ 为奇数} \tag{7a}$$

$$\bar{\sigma}_n(\bar{x} - n) = \begin{cases} F_{S-B}^n\bar{\sigma}_{TS}(\bar{x} - n) & \bar{x} \in [n, \bar{t}] \\ 0 & \bar{x} \in [\bar{t}, n + 1] \end{cases} \quad \bar{t} \in [n, n + 1], n \text{ 为偶数} \tag{7b}$$

因此,按照线性叠加原理,在透射波进入试件后的  $\bar{t}$  时刻,试件内的总应力分布为

$$\bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{t}) = \sum_{i=0}^n \bar{\sigma}_i \quad (8)$$

此即为试件内应力时空分布的最终结果。根据以上推导的计算公式,可以采用数值离散的方法,编制计算程序,模拟试件内的应力传播过程,计算试件内应力的时空分布以及其他相关结果。

### 3 试件应力均匀性分析

#### 3.1 应力均匀性的度量与平衡时间的定义

关于试件轴向应力均匀性的度量,不同文献采用了不同方法<sup>[4,6-11]</sup>。其中主要有两种:一是试件两端应力之差与其平均值之比<sup>[7-8,11]</sup>(事实上,此处采用试件两端应力的平均值近似代替试件中的总平均应力),用于已知试件两端应力的情况;第二种是试件两端应力之差与试件中平均应力之比<sup>[4,9-10]</sup>,用于已知试件两端应力及试件内平均应力的情况。本文中在计算试件应力时空分布的基础上分析试件的应力均匀性,因此采用第二种度量思路。但考虑到任意时刻试件中的应力分布比较复杂,其两端应力之差并不能完全代表整个试件内的应力最大差异,因此定义

$$U(\bar{t}) = \frac{\max_{\bar{x} \in [0,1]} \bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{t}) - \min_{\bar{x} \in [0,1]} \bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{t})}{\text{avg}_{\bar{x} \in [0,1]} \bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{t})} \quad (9)$$

来度量试件的应力均匀性,称为应力均匀度。式(9)中分母部分表示 $\bar{t}$ 时刻整个试件(即 $\bar{x} \in [0,1]$ )内的平均应力。显然, $U(\bar{t})$ 反映了 $\bar{t}$ 时刻试件中应力的均匀程度, $U$ 越接近于0,试件中应力越均匀。此外,由于试件中应力与 $1/\alpha$ 呈线性关系,即 $U(\bar{t})$ 与 $\alpha$ 无关,因此后文将不考虑 $\alpha$ 的影响。

尽管式(9)对应力均匀度的定义与文献[4,6-11]中有差异,但本文仍按照大多数文献中建议或者使用的5%作为判断试件应力平衡的临界值,定义达到 $U(\bar{t}) \leq 5\%$ 所需的最短时间为试件中应力的平衡时间,由 $t_u$ 表示, $\bar{t}_u = t_u/\tau$ 则表示量纲一平衡时间。

#### 3.2 计算结果

为分析入射波升时 $\bar{t}_r = t_r/\tau$ 和相对波阻抗 $\beta$ 对试件应力均匀性的影响,计算了不同 $\bar{t}_r$ 和不同 $\beta$ 的试件应力均匀度时程曲线以及相应的平衡时间。计算中的其他参数 $\alpha = 1$ , $\Delta \bar{t} = \Delta \bar{x} = 0.01$ 。

图1给出了应力平衡时间及其对 $\bar{t}_r$ 和 $\beta$ 的变化,图2给出了 $\bar{t}_r$ 相同, $\beta$ 不同时的部分应力均匀度时程曲线 $U-\bar{t}$ ,图3给出了 $\beta = 1/10$ , $\bar{t}_r$ 不同时的 $U-\bar{t}$ 曲线。

#### 3.3 结果分析

##### 3.3.1 $\bar{t}_r \leq 1$ 的情况

由图1可见,在 $\bar{t}_r \leq 1$ 时,相对波阻抗 $\beta$ 对应力平衡时间 $\bar{t}_u$ 影响很大,当 $\beta$ 增加时, $\bar{t}_u$ 大幅减小;但 $\bar{t}_u$ 对 $\bar{t}_r$ 并不敏感,只随 $\bar{t}_r$ 的增加而微弱增长,最大增加量仅为9%( $\beta = 1/2$ 的情况)。

由图2(a)~(b)和图3(a)可见,当入射波升时 $\bar{t}_r = 0$ ,即为矩形波时, $U-\bar{t}$ 曲线呈阶梯状下降,且 $\beta$ 越大,阶梯越明显。当 $0 < \bar{t}_r < 1$ 时,曲线也呈阶梯下降,但在每个台阶衔接处出现一个负向尖峰,尖峰的脉宽正好等于 $\bar{t}_r$ 。除此之外,曲线的其余部分与 $\bar{t}_r = 0$ 时的情况基本一致。 $\bar{t}_r = 1$ 时,曲线的台阶已经蜕化为尖峰,呈锯齿状振荡下降。事实上,在 $\beta$ 值一定的情况下, $\bar{t}_u$ 只受 $\bar{t}_r$ 微弱影响是由于 $\bar{t}_r = 0 \sim 1$ 时, $U-\bar{t}$ 曲线从阶梯状向锯齿状蜕化,但在此过程中,其包络线基本不变。

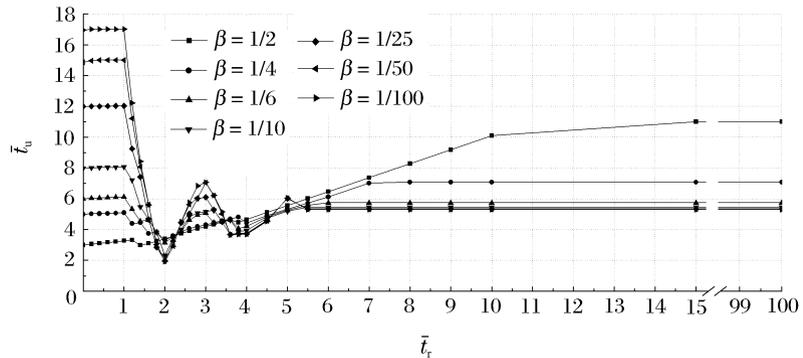


图1 平衡时间 $\bar{t}_u$ 对入射波升时 $\bar{t}_r$ 和相对波阻抗的变化情况

Fig. 1 Variation of  $\bar{t}_u$  with  $\bar{t}_r$  for different  $\beta$

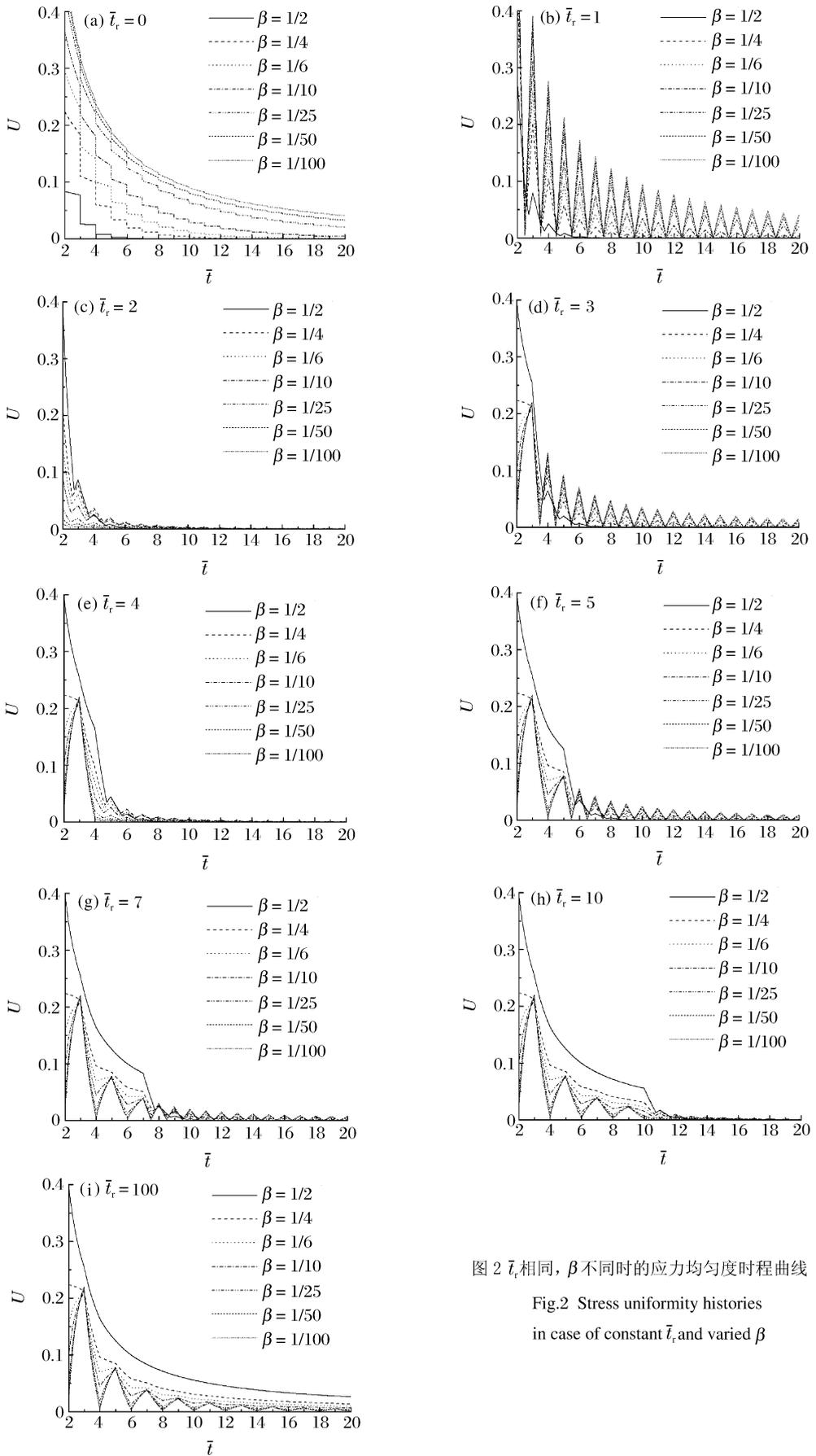
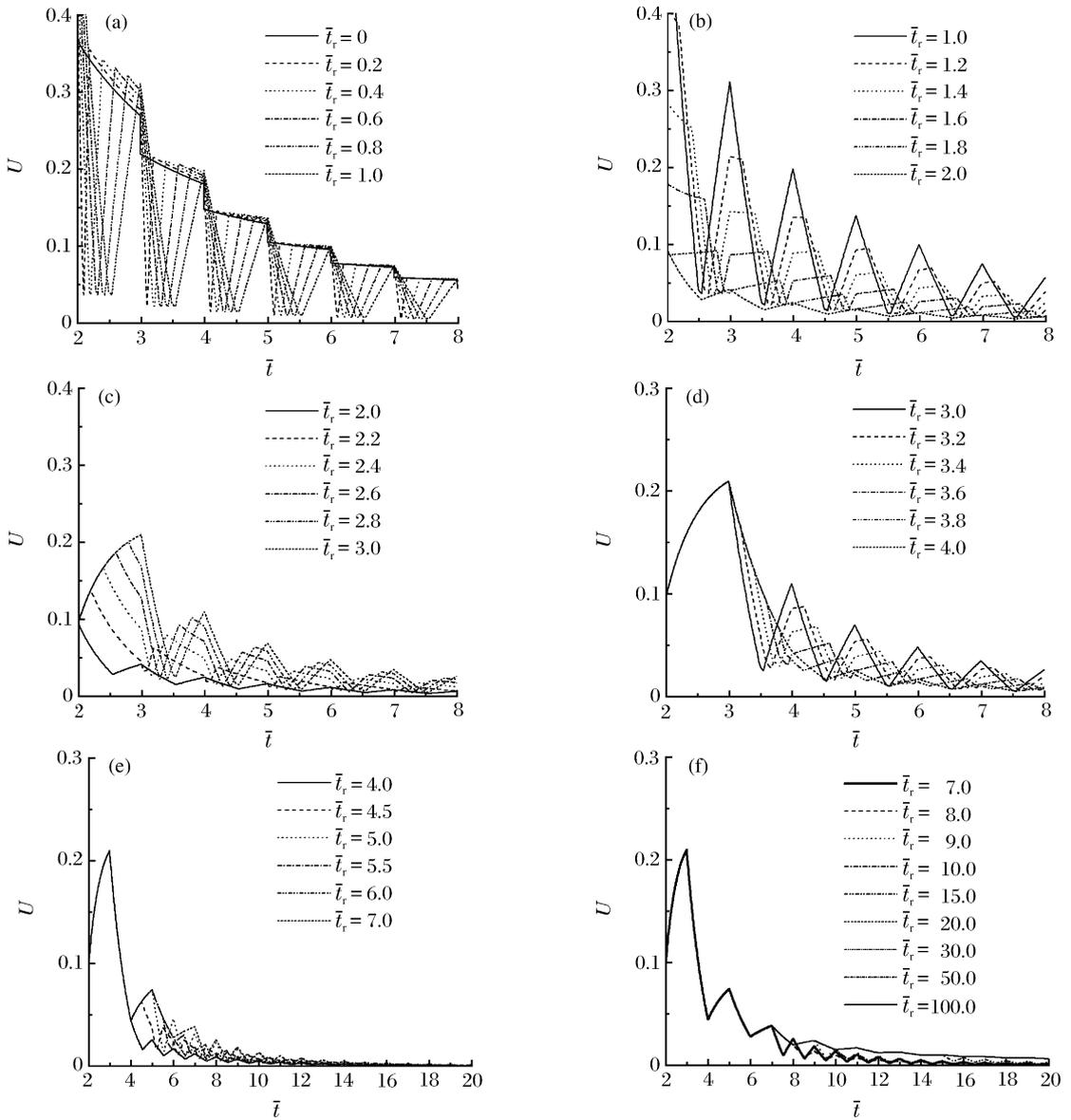


图 2  $\bar{t}_r$  相同,  $\beta$  不同时的应力均匀度时程曲线

Fig.2 Stress uniformity histories in case of constant  $\bar{t}_r$  and varied  $\beta$

图3  $\beta=1/10$ ,  $\bar{t}_r$  不同的应力均匀度历程曲线Fig. 3 Stress uniformity histories in case of constant  $\beta (=1/10)$  and varied  $\bar{t}_r$ 

### 3.3.2 $1 \leq \bar{t}_r \leq 7$ 的情况

由图1可见,在  $1 \leq \bar{t}_r \leq 7$  的情况下,试件应力的均匀性随  $\beta$  的变化规律比较复杂。

(1)  $1 \leq \bar{t}_r \leq 2$  时:平衡时间  $\bar{t}_0$  随  $\bar{t}_r$  的增加总体上呈下降趋势(除  $\beta$  较大的情况,如  $\beta=1/2$  时曲线较平,且出现轻微振荡), $\beta$  越小,下降越快。并且,  $\bar{t}_0 - \bar{t}_r$  曲线簇在  $\bar{t}_r = 1.8$  附近出现交叉,在此之前, $\beta$  越大,  $\bar{t}_0$  越短,交叉后规律相反,但差异较小。从图2(b)~(c)可以看到  $\bar{t}_r = 1 \sim 2$  时曲线大幅降低,且排列规律出现翻转。从图3(b)可以看到  $U - \bar{t}$  曲线在  $\bar{t}_r = 1 \sim 2$  时由锯齿波变为削峰锯齿波的过程。顺便指出,这里  $U - \bar{t}$  曲线出现锯齿状是由于入射波升时  $\bar{t}_r \approx 1$  时,试件两端应力在大部分时间内呈交替增长态势,从而导致了试件中应力最大、最小值差异的急剧变化。

(2)  $2 \leq \bar{t}_r \leq 3$  时:平衡时间  $\bar{t}_0$  随着  $\bar{t}_r$  的增加呈上升趋势,且  $\beta$  越小,上升越快。 $\bar{t}_0 - \bar{t}_r$  曲线簇在  $\bar{t}_r = 2.3$  附近出现交叉,在此之前, $\beta$  越大,  $\bar{t}_0$  越长,交叉后相反。从图2(c)~(d)可以看到整个  $U - \bar{t}$  曲线簇的回升。从图3(c)可以看到  $U - \bar{t}$  曲线由削峰锯齿状变回锯齿状的过程。

(3)  $3 \leq \bar{t}_r \leq 4$  时:  $\bar{t}_u$  随  $\bar{t}_r$  的增加总体上呈下降趋势 ( $\beta < 1/6$  时), 且  $\beta$  越小, 下降越快。 $\bar{t}_u - \bar{t}_r$  曲线簇在  $\bar{t}_r \approx 3.5$  时出现交叉, 在此之前,  $\beta$  越大,  $\bar{t}_u$  越短, 交叉后相反。从图 2(d)~(e) 和图 3(d) 可以看到上述变化主要是因为  $\bar{t}_r$  从 3 增加到 4 时,  $U-\bar{t}$  曲线随即从锯齿状变为削峰锯齿状, 整个曲线水平降低。

(4)  $4 \leq \bar{t}_r \leq 7$  时:  $\bar{t}_u$  随着  $\bar{t}_r$  的增加总体上呈上升趋势 (除  $\beta$  较小的情况, 如  $\beta = 1/25, 1/50$  和  $1/100$  时出现振荡, 并在  $\bar{t}_r = 5$  处有一尖峰)。从图 2(e)~(g) 和图 3(e) 可知, 形成上述变化规律主要是由于  $\bar{t}_r = 4 \sim 7$  时,  $U-\bar{t}$  曲线簇在  $\bar{t} = \bar{t}_r + 1$  附近区域内急剧下降, 此后保持在较低水平。

总的说来,  $1 \leq \bar{t}_r \leq 7$  时, 有 2 点值得注意: (1)  $\bar{t}_u - \bar{t}_r$  曲线簇在  $\bar{t}_r = 1.8, 2.3, 3.5$  三点附近存在交叉, 这表明, 在上述 3 处平衡时间  $\bar{t}_u$  对  $\beta$  不敏感。由图 2 可见在  $\bar{t}_r = 1, 2, 3, 4$  四点,  $\bar{t}_u$  随  $\beta$  的变化规律依次出现反转,  $\bar{t}_r = 1.8, 2.3, 3.5$  三个点正好就是其过渡过程中出现的交叉点。(2)  $\bar{t}_u - \bar{t}_r$  曲线在  $\bar{t}_r = 2, 3, 4$  三点存在 3 个明显的拐点, 其中  $\bar{t}_r = 2, 4$  两点为低点,  $\bar{t}_r = 3$  点为高点。当  $\bar{t}_r = 2$  时,  $\bar{t}_u = 1.9 \sim 3.4$ ;  $\bar{t}_r = 4$  时  $\bar{t}_u = 3.7 \sim 4.7$ ; 但在  $\bar{t}_r = 3$  时,  $\bar{t}_u = 4.2 \sim 7.1$ 。

### 3.3.3 $\bar{t}_r \geq 7$ 的情况

当  $\bar{t}_r \geq 7$  时, 图 1 中  $\bar{t}_u - \bar{t}_r$  曲线总体上较平, 且  $\beta$  越小, 越早形成水平线, 这表明  $\bar{t}_r \geq 7$  时  $\bar{t}_u$  已经对  $\bar{t}_r$  不敏感 ( $\beta = 1/2$  时稍晚进入不敏感区), 但随  $\beta$  值的增大而增加。由图 2(g)~(i) 和图 3(f) 可知,  $\bar{t}_r \geq 7$  时的  $U-\bar{t}$  曲线簇基本保持了相同的形态。但可以明显看出, 所有  $U-\bar{t}$  曲线在  $[\bar{t}_r, \bar{t}_r + 1]$  范围内突然下降, 交叉重合在一起并保持较低水平,  $\beta$  越大, 下降越剧烈。观察  $\bar{t}_r \geq 2$  时的其他曲线, 也可发现类似的规律。这种现象表明: 对于入射波升时较长的情况, 其应力均匀度曲线将在  $\bar{t} \in [\bar{t}_r, \bar{t}_r + 1]$  时急剧下降, 然后交叉重合在一起, 均匀性在  $\bar{t} = \bar{t}_r + 1$  之后得到明显改善, 改善程度受  $\beta$  影响,  $\beta$  越大, 改善越明显。

## 4 结束语

采用一维应力波理论, 计算分析了 SHPB 试验中试件应力均匀度及应力平衡时间随各参数的变化规律。根据计算结果, 可得到如下结论:

(1) 入射波相对升时  $\bar{t}_r \leq 1$  时, 试件应力均匀性对  $\bar{t}_r$  不敏感, 但受相对波阻抗  $\beta$  影响很大,  $\beta$  越大, 平衡时间  $\bar{t}_u$  越短。因此试件应力均匀性分析中,  $\bar{t}_r \leq 1$  的梯形波与矩形波没有实质性区别, 均可按矩形波分析; 此外对于  $\bar{t}_r \leq 1$  的梯形波加载, 要改善应力均匀性, 只有在试验设计中尽量提高相对波阻抗  $\beta$ 。

(2) 在  $\bar{t}_r = 1.8, 2.3, 3.5$  三点附近, 平衡时间  $\bar{t}_u$  对  $\beta$  不敏感, 且  $\bar{t}_u$  较短, 分别在  $3 \sim 4, 3 \sim 4$  和  $3 \sim 5$  之间。此现象的意义在于, 在 SHPB 试验中, 若能将入射波升时  $\bar{t}_r \leq 1$  调制到上述 3 点附近, 不论  $\beta$  为何值, 总能获得较短且相当的应力平衡时间。

(3) 在  $\bar{t}_r = 2, 4$  两点, 无论  $\beta$  为何值, 都具有较短的应力平衡时间, 在  $\bar{t}_r = 2$  时,  $\bar{t}_u = 1.9 \sim 3.4$ ;  $\bar{t}_r = 4$  时,  $\bar{t}_u = 3.7 \sim 4.7$ ; 但在  $\bar{t}_r = 3$  时,  $\bar{t}_u = 4.2 \sim 7.1$ 。此现象表明, 在 SHPB 试验中, 若能将  $\bar{t}_r$  调制到  $\bar{t}_r \approx 2$ , 可以获得最好的应力均匀性,  $\bar{t}_r = 4$  时次之, 但应尽力避免  $\bar{t}_r = 3$ 。

(4)  $\bar{t}_r \geq 7, \beta \leq 1/6$  时,  $\bar{t}_u$  对  $\bar{t}_r$  和  $\beta$  均不敏感, 保持在  $5 \sim 6$  之间。因此对于入射波升时较长 (或者是坡形波) 的情况, 只要在试验设计中保证  $\beta \leq 1/6$ , 即可获得  $\bar{t}_u = 5 \sim 6$  的相对平衡时间。

## 参考文献:

- [1] 李玉龙, 索涛, 郭伟国, 等. 确定材料在高温高应变率下动态性能的 Hopkinson 杆系统[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6): 487-492.  
LI Yu-long, SUO Tao, GUO Wei-guo, et al. Determination of dynamic behavior of materials at elevated temperatures and high strain rates using Hopkinson bar[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(6): 487-492.
- [2] 李玉龙, 郭伟国. 微型 Hopkinson 杆技术[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(4): 303-308.

- LI Yu-long, GUO Wei-guo. Miniature-Hopkinson bar technique[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(4): 303-308.
- [3] 王礼立, 朱兆祥. 应力波基础(第二版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 35-64.
- [4] Ravichandran G, Subhash G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing of ceramics in a split Hopkinson pressure bar[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1994, 77(1): 263-267.
- [5] Gray III G T, Blumenthal W R. Split-Hopkinson pressure bar testing of soft materials[M]// Kuhn H, Medlin D. SAM Handbook: Mechanical Testing and Evaluation. Materials Park, OH: ASM International, 2000: 488-496.
- [6] 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): 235-240.  
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): 235-240.
- [7] 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.
- [8] 朱钰, 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 Yu, HU Shi-sheng, WANG Li-li. Analysis on stress uniformity of viscoelastic material in split Hopkinson bar tests[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(4): 315-322.
- [9] 宋力, 胡时胜. SHPB 测试中的应力均匀性问题及恒应变率[J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(3): 207-216.  
SONG Li, HU Shi-sheng. Stress uniformity and constant strain rate in SHPB test[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(3): 207-216.
- [10] 宋力, 胡时胜. 软材料的霍普金森压杆测试新技术[J]. *工程力学*, 2006, 23(5): 207-216.  
SONG Li, HU Shi-sheng. A new technique for testing soft material using a modified hopkinson pressure bar[J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(5): 207-216.
- [11] GUO Ya-zhou, LI Yu-long. Quasi-static/dynamic response of SiO<sub>2</sub>-epoxy nanocomposites[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 458: 330-335.

## Axial stress uniformity in specimens of SHPB tests

MAO Yong-jian<sup>1,2</sup>, LI Yu-long<sup>1\*</sup>

(1. *School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;*

2. *Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)*

**Abstract:** Stress uniformity along the axial direction in specimens of split Hopkinson pressure bar (SHPB) tests was investigated. By theory of one-dimensional elastic stress wave, the temporal and spatial distribution of stress in specimen induced by incident pulses with any rising shape was derived. Wave propagation processes in specimens were calculated under rectangular, trapezoidal and sloping waves, which were uniquely expressed as the trapezoidal type by the parameter of rise time. Stress uniformity histories were obtained, and the influences of relative rise time of incident pulse and specimen-bar relative mechanical impedance on relative time required for stress uniformity were investigated. Researched results can provide guidelines to design and analyze SHPB tests.

**Key words:** solid mechanics; stress uniformity; one-dimensional stress wave theory; SHPB specimen

\* Corresponding author: LI Yu-long

E-mail address: liyulong@nwpu.edu.cn

Telephone: 86-29-88494859