

文章编号: 1001-1455(2005)03-0207-10

SHPB 测试中的均匀性问题及恒应变率*

宋力, 胡时胜

(中国科技大学力学与机械工程系, 安徽 合肥 230026)

摘要: 利用一维应力波理论对霍普金森压杆(SHPB)测试中的均匀性问题作了较为详尽的讨论, 对测试中各种加载波形的优缺点及各参数对均匀性的影响进行了分析与评估。给出了测试脆性材料时实现恒应变率加载的加载条件。对在满足应力均匀性要求下 SHPB 的可测应变率范围作了讨论并修正了前人不完善的结论。讨论了考虑均匀性时应采用的测试数据处理方法。利用图解的方法对弹塑性材料测试时的均匀性问题及相应加载要求作了定性分析, 指出对弹塑性材料, 测试中的应变不均匀也应予以考虑。

关键词: 固体力学; 应力均匀性; 一维应力波理论; SHPB; 恒应变率

中图分类号: O348; TB34

国标学科代码: 130 · 15

文献标志码: A

1 引言

霍普金森压杆(SHPB)实验技术已普遍应用于工程材料在高应变率下的力学性能测试, 自 H. Kolsky 提出这项动态测试技术后, 实验的可靠性及数据的处理均建立在一维假定及均匀假定的基础上, 这引起对该实验方法一定程度的疑问。20 世纪 60 年代初, E. D. H. Davis 等^[1]采用能量方法对试件中惯性效应的分析是早期对应力均匀性问题较为系统的研究, 其结论已被大多数人接受, 即在满足一定的试件几何特性要求及加载条件下, 均匀假定是可以成立的, 实用上尤其在金属材料的动态测试上效果也比较好。然而, 近年来 SHPB 的测试对象已拓展到各式各样的材料中, 如陶瓷、岩石、混凝土等脆性材料, 橡胶等软材料, 泡沫塑料等。人们在实际的测试中发现应力均匀性尚存在问题, SHPB 测试的可靠性又重新引起关注。现有测试在均匀性方面存在着下面 2 种情况: (1) 对脆性材料, 当试件被加载至破坏、测试终止时, 其两端面的应力差别明显, 应力并不均匀, 所以测得的结果是不可靠的; (2) 对软材料, 要达到试件内的应力均匀需要较长的时间, 这样当加载速率过高时, 测试结果有可能是无效的。尽管对于上述 2 种情况下的应力均匀性问题已有一些研究结果, 但从现有相关文献看, 这一工作做得尚比较零乱、不够系统, 结果也不尽相同^[2~7]。

对于 SHPB 测试的恒应变率控制, 早期并不受重视, 另外由于它和未知的材料特性有关, 在技术上实现起来也比较困难, 随着对材料性能的认识和要求的提高, 在近年的研究中已开始通过控制加载实现恒应变率条件下的测试^[2]。

已有的研究表明, 陶瓷、岩石等脆性材料在高应变率下的响应基本上遵循弹-脆破坏的模式, 其模量也并不明显受应变率的影响。金属材料, 即便是率敏感的, 其弹性阶段响应也不受应变率影响。本文中主要讨论弹性材料或材料的弹性阶段, 对于弹塑性材料, 则在对问题适当简化的基础上对其 SHPB 测试的均匀性及恒应变率加载控制问题作了初步的讨论。

2 SHPB 实验的应力波分析

SHPB 测试时试件内应力波传播如图 1 所示(图中为阶跃入射波, 一般情形则可视为一系列阶跃增量入射波的叠加), 这里仅分析加载过程。I、II 截面上的应力 σ_I 、 σ_{II} 及截面速度 v_I 、 v_{II} 可以通过杆

* 收稿日期: 2004-05-10; 修回日期: 2005-03-08

作者简介: 宋力(1961—), 男, 博士研究生。

中的应变信号由一维弹性波理论确定,他们都是可测的。下面的讨论只涉及弹性波,这对弹脆材料是适用的,而对一般材料,均匀性问题主要是加载前期的问题,故弹性波分析仍可具有一般意义。

在图 1 中,令 $\alpha = \frac{A}{A_0}, \beta = \frac{\rho c A}{\rho_0 c_0 A_0}, t_0 = \frac{l_0}{c_0}$, 则

$$F_{B-S} = \frac{1-\beta}{1+\beta}, T_{B-S} = \frac{2}{1+\beta}, F_{S-B} = \frac{\beta-1}{\beta+1}, T_{S-B} = \frac{2\beta}{\beta+1}$$

ρ, c, A 分别表示密度、波速、截面积, F 为反射系数, T 为透射系数, 下标 B-S 表示波从杆传到试件, S-B 表示波从试件传到杆。

按应力波理论^[8], 并利用叠加原理, 试件 I、II 端面及内部的应力, 试件的平均应力, I、II 端面的速度及试件的平均应变率可由下式计算

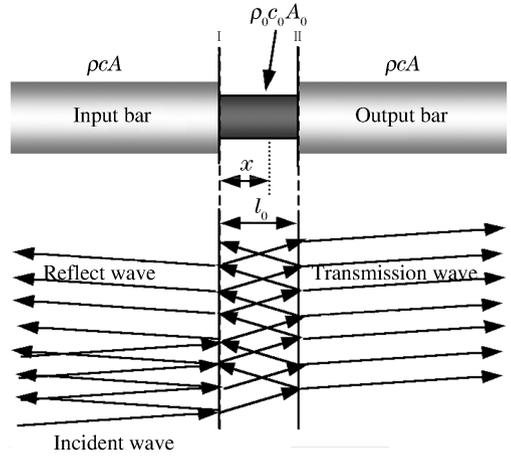


图 1 SHPB 测试中的应力波传播
Fig. 1 Wave propagation within a SHPB specimen

$$\begin{cases} \sigma_I(t) = \begin{cases} \alpha T_{B-S} \sigma_i(t) & 0 \leq t < 2t_0 \\ \alpha T_{B-S} [\sigma_i(t) + (F_{S-B} + F_{S-B}^2) \sigma_i(t - 2t_0) + \dots + (F_{S-B}^{2n-1} + F_{S-B}^{2n}) \sigma_i(t - 2nt_0)] & nt_0 \leq t < 2nt_0 \\ 0 & 0 \leq t < t_0 \end{cases} \\ \sigma_{II}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_0 \\ \alpha T_{B-S} [(1 + F_{S-B}) \sigma_i(t - t_0) + (F_{S-B}^2 + F_{S-B}^3) \sigma_i(t - 3t_0) + \dots + (F_{S-B}^{2n-2} + F_{S-B}^{2n-1}) \sigma_i(t - (2n-1)t_0)] & (2n-1)t_0 \leq t < (2n+1)t_0 \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sigma(x, t) = \alpha T_{B-S} \sigma_i(t - x/c_0) H(t - x/c_0) & 0 \leq t < t_0, 0 \leq x < l_0 \\ \text{设 } \sigma_{2n} = \alpha T_{B-S} [\sigma_i(t - x/c_0) H(t - x/c_0) + \dots + F_{S-B}^{2n-1} \sigma_i(t - (2nt_0 - x/c_0)) H(t - (2nt_0 - x/c_0)) + F_{S-B}^{2n} \sigma_i(t - (2nt_0 + x/c_0)) H(t - (2nt_0 + x/c_0))] \\ \text{则 } \sigma(x, t) = \begin{cases} \sigma_{2n} - F_{S-B}^{2n} \sigma_i(t - (2nt_0 + x/c_0)) H(t - (2nt_0 + x/c_0)) & (2n-1)t_0 \leq t < 2nt_0 \\ \sigma_{2n} & 2nt_0 \leq t < (2n+1)t_0 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \bar{\sigma}(t) = \frac{\alpha T_{B-S}}{t_0} \left(\int_{t-t_0}^t \sigma_i(t) dt + F_{S-B} \int_{t-2t_0}^{t-t_0} \sigma_i(t) dt + \dots + F_{S-B} \int_0^{t-nt_0} \sigma_i(t) dt \right) & (n-1)t_0 \leq t < nt_0 \\ \bar{\sigma}_{12}(t) = (\sigma_I(t) + \sigma_{II}(t))/2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} v_I(t) = \begin{cases} \frac{\beta T_{B-S} \sigma_i(t)}{\rho c} & 0 \leq t < t_0 \\ \frac{\beta T_{B-S}}{\rho c} [\sigma_i(t) - (F_{S-B} - F_{S-B}^2) \sigma_i(t - 2t_0) - \dots - (F_{S-B}^{2n-1} - F_{S-B}^{2n}) \sigma_i(t - 2nt_0)] & 2nt_0 \leq t < (2n+1)t_0 \\ 0 & 0 \leq t < 2nt_0 \end{cases} \\ v_{II}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 2nt_0 \\ \frac{\beta T_{B-S}}{\rho c} [(1 - F_{S-B}) \sigma_i(t) - (F_{S-B}^2 - F_{S-B}^3) \sigma_i(t - 3t_0) - \dots - (F_{S-B}^{2n-2} - F_{S-B}^{2n-1}) \sigma_i(t - (2n-1)t_0)] & (2n-1)t_0 \leq t < (2n+1)t_0 \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{\dot{\epsilon}} = \begin{cases} \frac{\beta T_{B-S}}{\rho c l_0} \sigma_i(t) & t \leq t_0 \\ \frac{v_I - v_{II}}{l_0} = \frac{\beta T_{B-S}}{\rho c l_0} [\sigma_i(t) - (1 - F_{S-B}) \sigma_i(t - t_0) - \dots - (F_{S-B}^{n-1} - F_{S-B}^n) \sigma_i(t - nt_0)] & nt_0 \leq t < (n+1)t_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\sigma_i(t)$ 为入射波应力, 零时间参考位置为 I 截面处, $\bar{\dot{\epsilon}}$ 为试件的平均应变率, $\bar{\sigma}$ 为试件内的平均应力, $\bar{\sigma}_{12}$ 为可测平均应力, $H(t)$ 为单位阶跃函数, $n=1, 2, 3, \dots$ 。另外, 约定压应力为正。

3 典型加载情况下的应力不均匀性

SHPB 测试时的应力不均匀性可由 $R(t) = (\sigma_1 - \sigma_{II}) / \bar{\sigma}$ 来衡量^[6], 一般而言, 当 $R(t) < 5\%$ 时可以认为应力达到了均匀。典型加载波形通常可分为矩形、梯形及斜坡形, 图 2 即为按方程(1)~(5)计算得到的在这几种入射波形下的应力均匀性及应力幅值随时间变化的情况, 计算中引入了量纲一时间 $t^* = t/t_0$ 。

图 2(a)为矩形波加载时情况, 可以看到应力均匀化时间随广义波阻比 β 的增加而增加, 在 $\beta=4$ 时, 应力均匀时间尚较小(约 $5t_0$), 但此时试件内应力幅值已非常接近最大值, 所以有效测试范围很小, 也很难控制加载使破坏应力处于该有效测试范围内; 这里可看出在对应力均匀性进行考查时需要将应力幅值考虑进去(一个简单的例子就是考虑 β 趋于 1 的极限情况, 此时均匀时间趋于 t_0 , 但实际上均匀后应力即进入平台, 应变率为 0, 这样的测试是完全无效的), 在 β 较大时, 矩形加载的均匀性不佳。在实际测试中入射波接近矩形的情况如传统的直接撞击加载技术^[9]及使用普通 SHPB 测试低波速材料时的情形, 从上面分析看这是应该避免的, 后面也不再对其作进一步的讨论。图 2(b)、(c)分别为梯形波及斜坡加载时的情形, 易看出应力均匀时间均随 β 的增大而减小, 而梯形加载时可以最快地达到应力均匀(约 $3t_0$), 斜坡加载则差一些(约 $5t_0$), 但在满足应力均匀条件下可以有更大的有效测试范围, 这一点从图 2(d)中更易看出来。从图中还可看出 β 较大有利于尽快达到应力均匀, 而传统上对此是较少考虑的, 常常仅考虑阻抗匹配以获得较强的测试信号。另一个显然的结论就是对确定的加载方式, 应力不均匀性及量纲一平均应力($\bar{\sigma}/(\alpha\sigma_0)$ 或 $\bar{\sigma}/(\alpha kt_0)$)随量纲一时间 t^* 的变化实际上只取决于广义波阻比 β 。

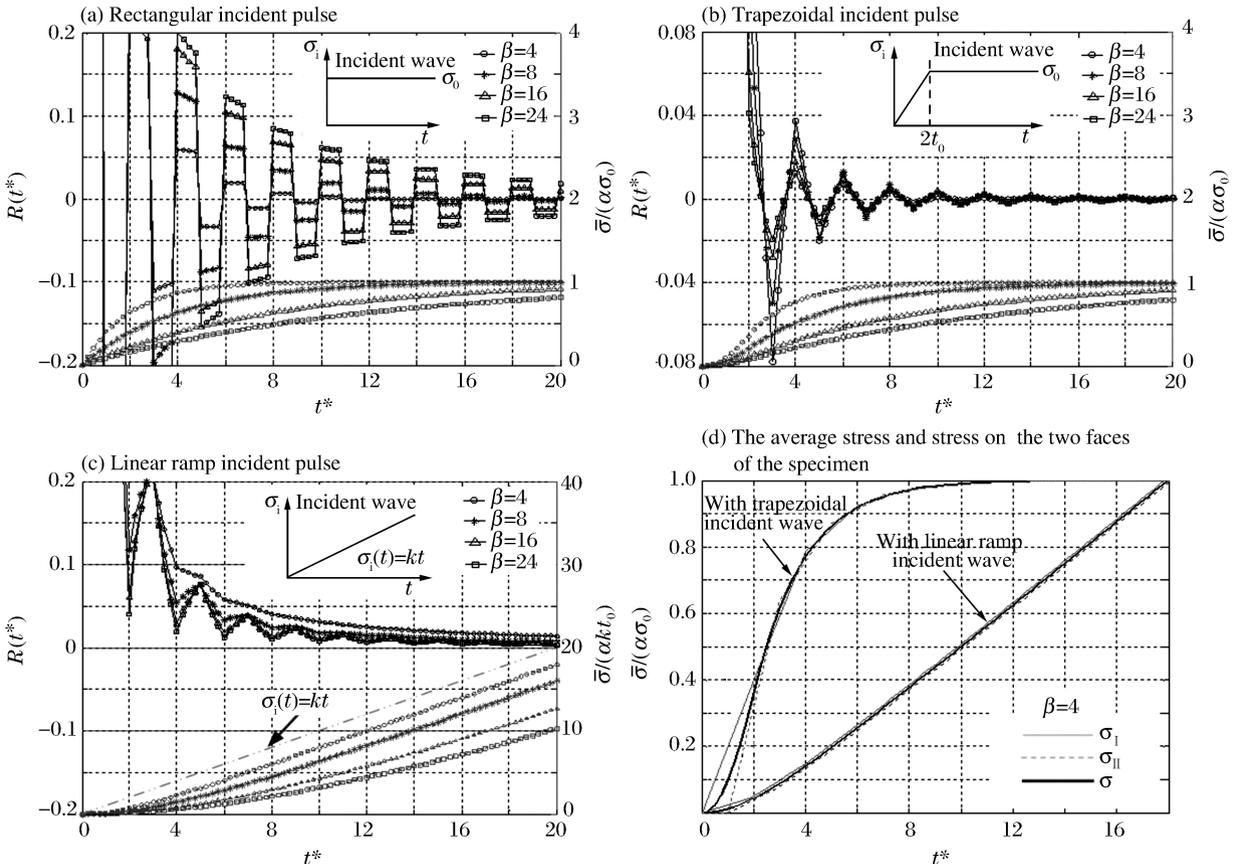


图 2 典型入射波作用下试件内应力幅值及均匀性
Fig. 2 Stress and stress uniformity under typical loading condition

4 恒应变率加载

4.1 恒应变率加载的实现

从前面的结果已可以看出在各种加载条件下试件内应力均匀性的变化情况,然而,对于动力学测试而言,还必须考虑测试的应变率这一重要指标。传统上 SHPB 测试其应变率一般只是大概值,这是一个明显的技术上的不足。实际上,通常形式为 $\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})$ 的动态本构方程实验拟合均默认应变率为常数,从而在使用实验数据拟合相应参数时会引入新的误差。从测试的角度,实现恒应变率使原来的自变量成了固定参量,从而有利于更清楚地认识材料的性质。实现恒应变率加载的另一好处就是可以大大减小横向惯性效应对测试的影响^[1]。实现恒应变率加载的一个困难是需要已知材料的性质,而这正是待测的,但如果采用合适的测试-试凑方式,这个目标是可以实现的,而对弹性响应材料则更容易一些。考虑弹性材料,加载初始段为斜坡的情形,此时入射波为 $\sigma_i(t) = kt$,代入方程(5)得到

$$\bar{\epsilon} = \frac{\beta T_{B-S}}{\rho c l_0} k [t - (1 - F_{S-B})(t - t_0) - (F_{S-B} - F_{S-B}^2)(t - 2t_0) - \dots - (F_{S-B}^{n-1} - F_{S-B}^n)(t - nt_0)] \quad (6)$$

易看出只需施加图 3(a)所示的入射波即可实现 $t > nt_0$ 以后的恒(平均)应变率加载。图 3(b)为典型恒应变率、斜坡及梯形加载时的应变率随时间的变化情况,图 4 则为不同广义波阻比下的恒应变率($n=2$)入射波形及相应条件下的应力幅值及应力不均匀性随时间变化的情况,可以看出,当波阻比较小时恒应变率加载很接近斜坡,而当波阻比很大时恒应变率加载接近梯形波,实际上,斜坡及梯形分别为波阻比趋于 1 及 ∞ 时恒应变率加载的极限入射波。

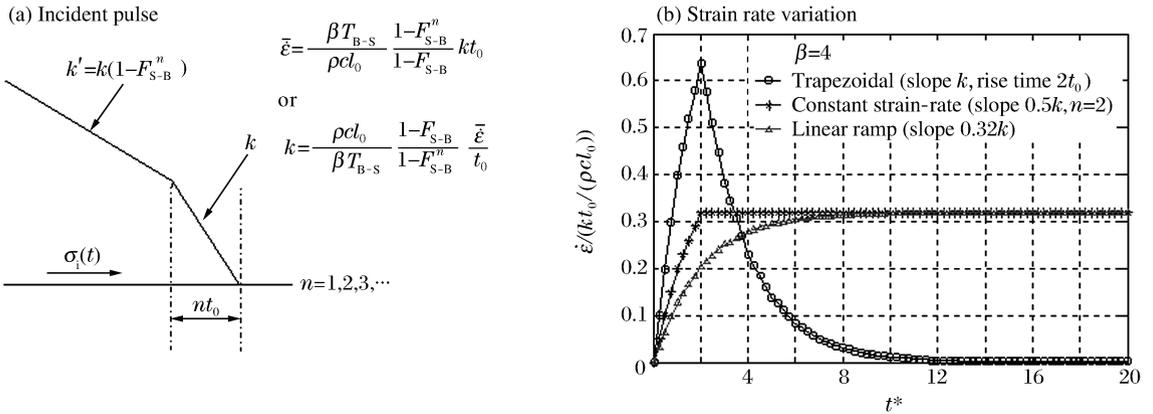


图 3 恒应变率加载

Fig. 3 Constant strain-rate loading

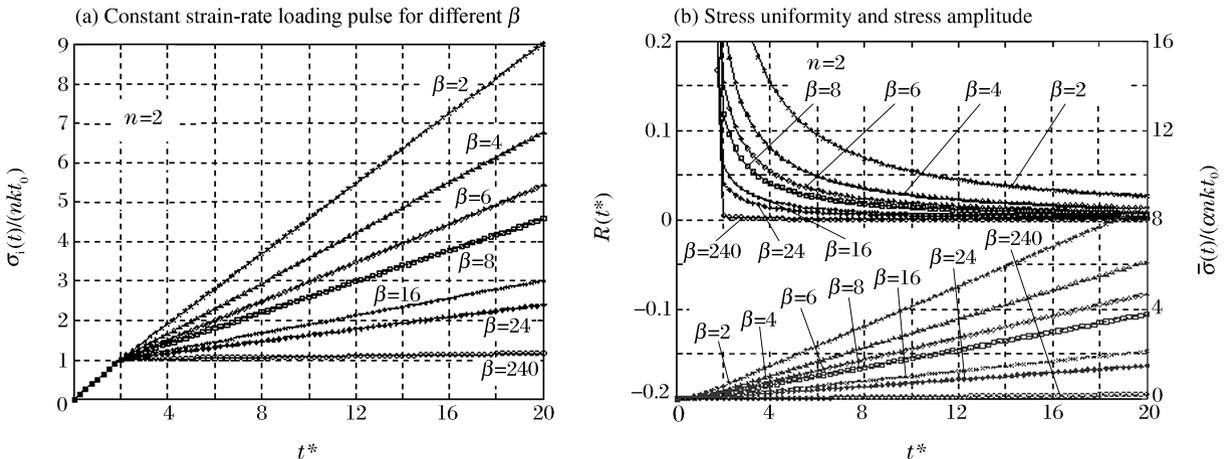


图 4 恒应变率加载下的相关结果

Fig. 4 Calculated results under constant strain-rate loading

4.2 考虑加载应变率时各种入射波形的比较

前面比较典型入射波形下应力均匀性时并未将应变率考虑进去,对动态测试这显然是不合适的, SHPB 测试总是希望得到可靠的动态应力应变曲线,故对均匀性、应力幅值及应变率应综合考虑。另一方面,对于脆性材料,有时要做到在大的测试范围内 $R(t) \leq 5\%$ 是困难的,但至少希望所测的动态强度是可靠的,因此可以从测得有效的动态应力应变曲线和可靠的动态压缩强度两个方面来比较各种加载方式的优缺点。图 5 为在给定应变率(图中为 $2.56kt_0/(\rho cl_0)$)下材料的破坏应力分别为 $\sigma_{t_1} \sim \sigma_{t_5}$ (相应量纲一破坏应力为 $\sigma_{t_i}^* = \sigma_{t_i}/(\alpha kt_0), i=1,2, \dots, 5$) 时通过不同加载路径抵达同一测试终点时应力均匀性的变化情况,可以看到,在破坏点 1,无论采用那种加载方式,直到试件破坏时试件内应力都不能达到均匀。对应破坏点 2、3,则仅梯形加载在试件破坏时或破坏前能达到应力均匀;当破坏点为 4、5 时则 3 种加载方式在破坏时均已满足应力均匀性要求。这里测试应变率及材料的量纲一破坏应力决定了测试是否有效(这里的 k 可人为给定)。显然,仅从破坏时的应力均匀性看,梯形加载是最好的,但梯形加载也有明显的缺点,实际上它在满足均匀条件下的可测应力范围最多只能为其加载波平台应力值的 0.345 倍,测试过程中应变率变化很大,而且它的前期应力均匀性也不好。恒应变率加载时应力均匀性与梯形加载相比要差一些,但相差并不大(对应 2 点, $R(t) \approx 7\%$, 梯形时 $R(t) \approx 5\%$) 且前期部分变化较为平缓,而它在量纲一破坏应力相对量纲一应变率较大时有更大的有效测试范围(以点 5 为例,约为梯形加载时的 2 倍),总的来看,认为恒应变率加载是较优的方式。从图中还可以看出,斜坡加载的应变率是接近恒应变率加载的,2 种加载方式的应力不均匀性则大致相当,所以如果对恒应变率的要求放松一些,斜坡加载是合适的,这样加载波形的实现比较容易。

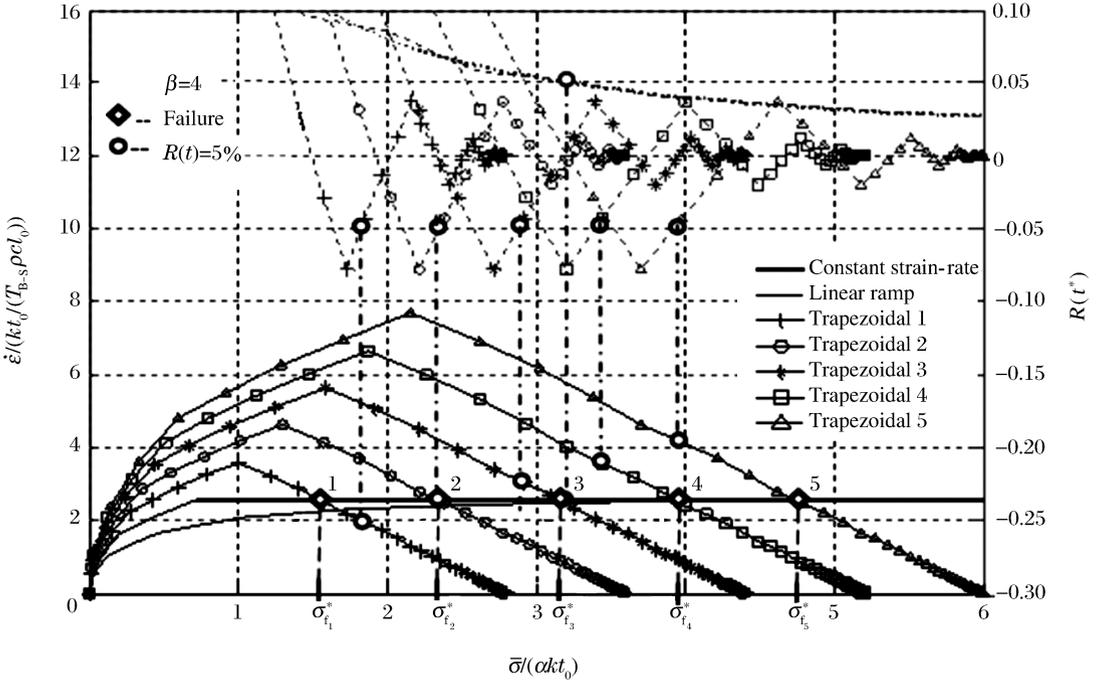


图 5 不同加载方式下的应力不均匀性

Fig. 5 Stress ununiformity under different loading condition

从上面的讨论可知,对于动态测试,如果对均匀性有要求,在试件极限应力(或应变)有限的情况下, SHPB 最大的可测试应变率是受到限制的,这可以利用图 3、图 5 的应变率、应力不均匀性曲线得到,按 G. Ravichandrant 等^[6]的分析,最大可测应变率

$$\dot{\epsilon}_1 = \epsilon_f c_0 / (\theta l_0) \tag{7}$$

式中: ϵ_f 为被测材料的破坏应变, θ 为仅由入射波形态决定的系数, G. Ravichandrant 等^[6]认为对一般脆性材料 ($\beta=4 \sim 8$) 在斜坡加载时可取为 4。我们分析的结果表明实际上 θ 还和广义波阻比 β 有很大的关

系,图 6 是计算后得到的在不同 β 下的理论最大可测应变率,可见 $\theta=4$ 只是 $\beta=5$ 左右时的结果。从图 6 还可看出恒应变率加载方式优于线性斜坡加载,斜坡加载用于低波阻抗材料的测试时效果明显不好。这里也可看到如果仅考虑破坏时的均匀性,梯形加载方式最佳。

从前面的结果看,对于脆性材料,要做到有效测试段内应力均匀是困难的,但另一方面,对线性响应材料,即使内部应力不完全均匀,试件内的(平均应变、平均应力)点仍将位于其 $\varepsilon-\sigma$ 曲线上,即便是有弱的非线性,按局部线化的近似也会得到同样的结论。在 SHPB 测试中,实际测试应变即是平均应变,可由公式(6)积分得到,但平均应力并不可测,可测平均应力 $\bar{\sigma}_{12}$ 与平均应力有区别,图 7 给出了 3 种入射波形下可测平均应力与平均应力间的相对误差 R_{12} ,可以发现在 $t > 2t_0$ 后, $\bar{\sigma}$ 与 $\bar{\sigma}_{12}$ 的差别已可忽略,而恒应变率加载时最为理想,其在应变率恒定后有 $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{12}$,实际上这也不难从公式(1)~(5)推出。从上面的分析可知,采用可测平均应力来确定动态应力应变曲线的三波法在处理 SHPB 的测试结果具有最好的精度,另外,相对于传统的方法,它也将大大减少数据处理中的人为因素。

5 应力均匀性的进一步讨论

5.1 最佳均匀性加载

前面已经比较了各种入射波条件下的应力均匀性问题,但并不能完全确认哪种入射波最佳,对于弹性材料测试(或测试时的弹性段),这个问题是可以找到答案的。首先考虑试件与杆的相互作用(见图 8),如果设想杆-试件的作用是以界面速度方式施加的,则图中所示的速度边界条件将导致 $2t_0$ 时间后试件中的应力完全均匀,同时应变率完全恒定,我们认为这是可以达到的最佳应力均匀加载方式,实际上这相当于弹性杆中二线性斜坡应力波迎面加载时的情形。尽管上述的理想状态不可能完全实现,但接近它是可能的。实际上,如果被测材料的广义波阻远小于杆的广义波阻,当左端杆的运动速度如(接近)图 8(a)所示时,可以认为有最佳的均匀性,这种加载方式已运用于我们新近提出的软材料 SHPB 测试的改进方案^[10]。进一步,当右端为刚壁时,由一维应力波分析知,图 8(b)所示的入射波可以实现图 8(a)所要求的速度边界。在实际测试中右端的透射杆将会产生变形,可以将此问题分解为图 8(c)、(d)2 部分的叠加,一部分透射杆为刚性,另一部分为透射杆向试件作用一拉伸波 $\sigma_1^{\text{II}}(t)$ 。

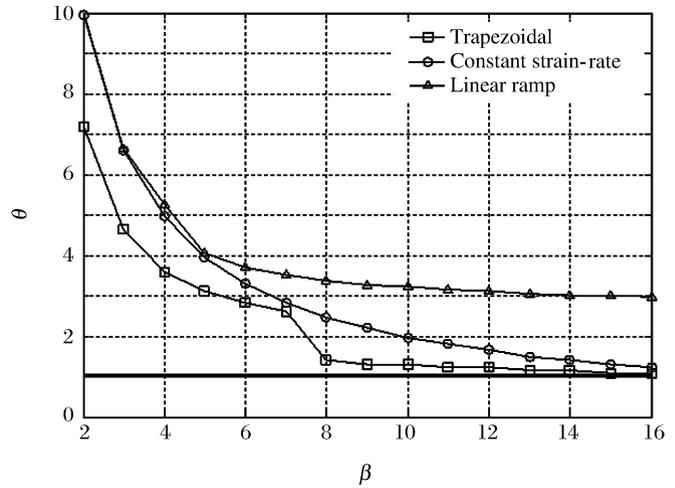


图 6 不同广义波阻比下的 θ

Fig. 6 Value of θ for different β

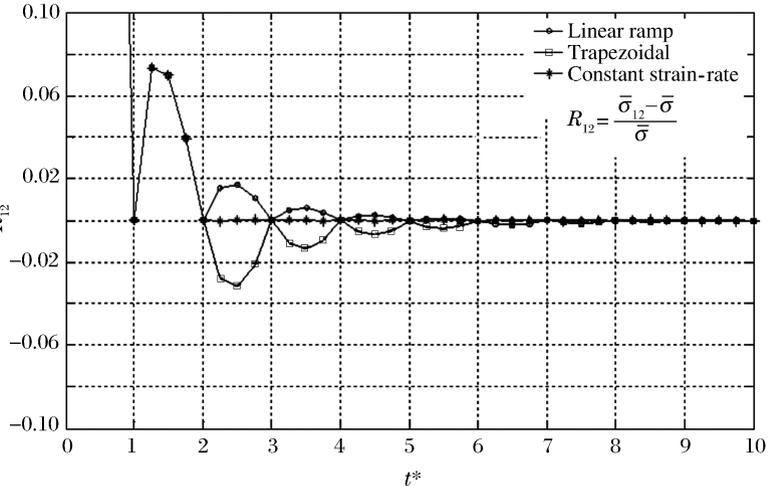


图 7 不同入射波时的应力偏差

Fig. 7 Stress deviation for different incident pulse

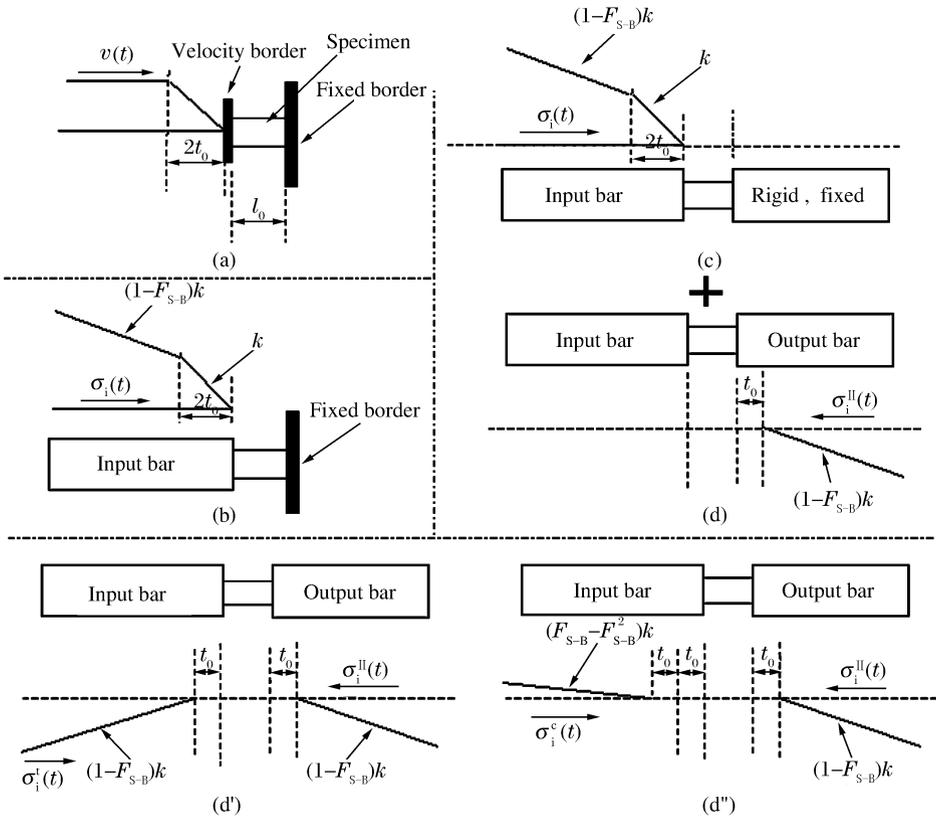


图 8 最佳加载入射波
Fig. 8 The best incident pulse

由图 8 可以得出以下结论: (1) 对任何试件, 在破坏时应力要达到完全均匀, 则测试应变率不能超过 $\epsilon_f c_0 / l_0$, 对比图 6 知, 这对应 β 趋于无穷大时的极限情况 (对应 $R(t) = 5\%$, 极限最大可测应变率为 $\epsilon_f c_0 / \left(\frac{5+2\sqrt{5}}{10} l_0\right)$); (2) 为达到最佳的应力均匀性, 应在入射杆中加入图 8(d') 中所示的对称拉伸波 $\sigma_i^t(t)$, 这正是 L. M. Yang 等^[7] 提出的所谓增强应力平衡加载入射波形 (见图 9), 在这种入射波作用下, 试件左右端面应力在 $2t_0$ 以后将保持相等从而有 $R(t) \equiv 0$, 但试件内的应力不均匀性仍然存在, 可以由公式(3)并引入相应定义来计算。实际上直接从图 8(d') 并利用对称性可看出, 试件中心截面相当于刚壁, 进而由波传播分析可得试件中的最大应力 (图 8(c)、(d') 叠加) 位于其中心截面, 此种情况下应力的不均匀性不能由 $R(t)$ 来描述; 另外, 在前述的 3 种加载波形中, 易看出梯形波入射与它最为接近。从图中还可知, 若要实现 $2t_0$ 后的恒应变率, 可在入射杆施加另一入射波 $\sigma_i^c(t)$ 以使图 8(d'') 中试件左右端面在 $2t_0$ 后有相同的运动速度, 这将得到和前面一样的结果; 从图解还可看出, 对真实测试, 实现恒应变率加载与实现最佳应力均匀性是有矛盾的, 尤其当 β 不大 (故 F_{S-B} 较小) 时, 而线性斜坡加载属于递增应变率加载, 均匀性要差一些, 这和前面的结果是一致的。

5.2 弹塑性材料 SHPB 测试的简化分析

考虑材料为理想弹塑性, 透射杆一端为刚性的简化情况。仍然分析图 8(a), 如果使被测材料在屈

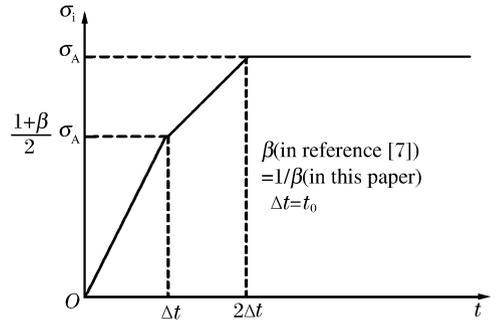


图 9 增强应力平衡加载波^[7]
Fig. 9 Shape of incident pulse for enhanced stress equilibrium^[7]

服前达到完全均匀(即 $\bar{\epsilon}_{t_0} < \epsilon_Y$, ϵ_Y 为屈服应变),可以得出如图 10 所示的入射波将实现其要求的最佳加载,即在 $2t_0$ 应力完全均匀同时变形为恒应变率;而在进入塑性后,其均匀性表现为各处应力恒定而速度梯度相等(对应应变均匀)。这样的入射波形与传统的 SHPB 加载波形非常接近,但是,这里要求入射波平台的拐点 A 正好在试件(均匀地)进入塑性变形的时刻,若不满足该要求,则在材料屈服后尽管应力均匀性不成问题,试件中仍将出现应变的不均匀(这在一般关于均匀性的讨论中似乎被忽视了),这种情况通常发生在较软材料的 SHPB 测试中,对于递减硬化或双线性材料也可作类似的讨论。

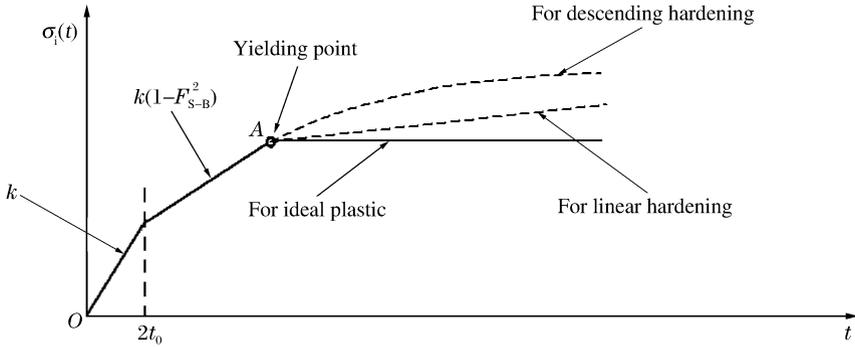


图 10 理想状态下弹塑性材料测试的最佳加载

Fig. 10 Best loading waveform for elastic-plastic material testing under idealized condition

需要注意的是,对于一般金属材料实际测试,由于波在压杆中的几何弥散,以 $\varnothing 14.5$ 杆为例,入射波上升时间将在 $10 \mu s$ 以上,大致相当于 $8t_0$ 以上,试件进入屈服的时间通常也在此之后。仍然考虑理想弹塑性材料,屈服前试件内的应力、质点速度仍可按前面的方法计算,而屈服后各点速度梯度的均匀性,可以认为取决于屈服前的瞬间(这里有一定的近似,因为试件内各点进入屈服的时间仍有不同)。考虑斜坡加载(斜率为 k)及二段型斜坡加载(初始斜率 k ,后续斜率 k' ,转折时间 $8t_0$,可参见图 3(a)),试件两端应力差值及加载应变率变化如图 11 所示;结合图 2 知,如果仍以 $R(t)$ 来衡量均匀性,则这 2 类加载下应力均匀性都可以保证,而斜坡-平台型加载最好,这是指材料屈服之前;当材料屈服后,试件内波速将下降为零(理想塑性时),进一步的“加载”(这里是“速度”加载),将可能造成试件内应变的严重不均匀,而斜坡加载时的情形正是这样。上述分析也提供了一种从直观上判断加载品质好坏的方法(图 12),即在试件进入塑性后(依据透射波或按三波法处理),好的加载波形其加载应变率(反射波或按三波法处理)不应有明显的爬升,这在传统 SHPB 测试中通常是满足的,而在使用脉冲整形技术时,这一点则需要注意。对于一般弹塑性材料,情况要复杂一些,但其基本趋势是类同的,具体则可采用特征线数值方法或有限元方法予以分析。

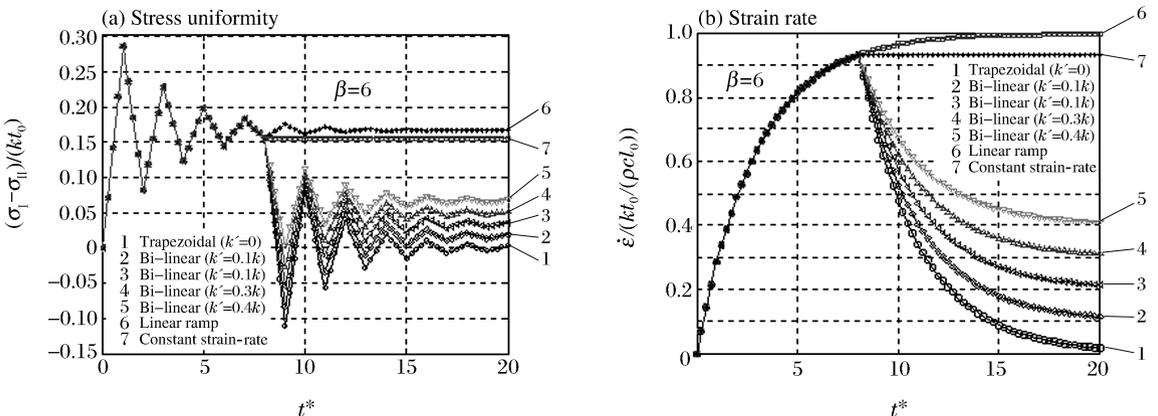


图 11 典型金属材料测试时屈服前的应力不均匀性及应变率变化

Fig. 11 Stress ununiformity under typical test of metal before yielding

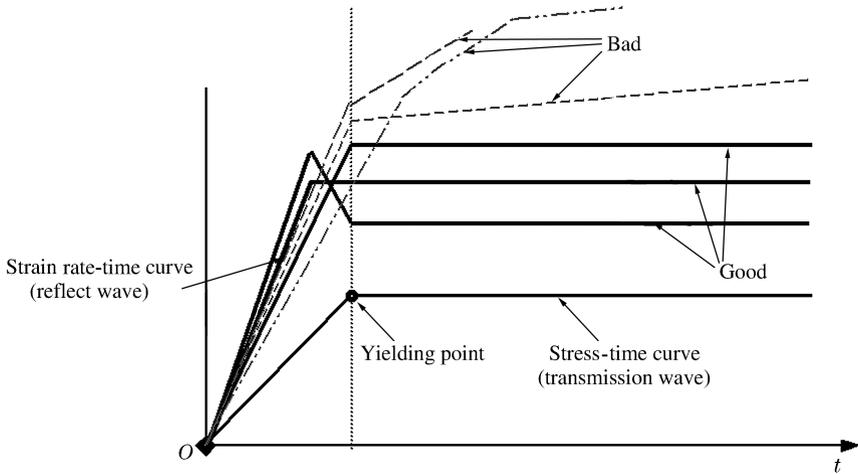


图12 加载状况优劣的直观判断

Fig. 12 Graphic patterns of good or bad loading condition

6 结 论

(1) 对于特定的入射波形,应力不均匀性随特征时间的变化由杆与试件间的广义波阻比唯一地确定。矩形波加载由于应力不均匀严重,对于任何材料的 SHPB 测试都是不适合的。

(2) 得到了对脆性材料实现恒应变率 SHPB 测试所需入射波形的一般公式。

(3) 给出了满足一定应力均匀性前提下 SHPB 测试最大可测应变率算式及相应关系曲线。

(4) 通过比较各种加载入射波形下的应力不均匀性及应变率变化,指出恒应变率加载具有最好的综合效果,而线性斜坡入射在波阻比不太大时和前者接近。

(5) 给出了数据处理中的三波法的物理含义,并指出其具有最好的处理精度。

(6) 通过对简化模型的定性分析,指出通过对应变率的控制,可以改善塑性段测试的应变不均匀性。

本文中的讨论虽然仅限于 SHPB,但实际上相应的结论对 SHTP(霍普金森拉杆)也是适用的。另外,如果测试包括卸载部分,则也存在应力不均匀的问题,由于卸载大多近于弹性,若近似地认为卸载前试件内应力、应变已完全均匀化,则采用同样的方法对其进行分析即可,然而要实现满足相应要求的入射波形则将更困难。

参考文献:

- [1] Davies E D H, Hunter S C. The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of Mechanical Physics Solids, 1963,11(1):155-179.
- [2] Gray III G T. Classic split-Hopkinson pressure bar testing[A]. Kuhn H, Medlin D. SAM Handbook, Mechanical Testing and Evaluation, Vol. 8[M]. Materials Park, OH: ASM International, 2000:462-476.
- [3] Gray III G T, Blumenthal W R. Split-Hopkinson pressure bar testing of soft materials[A]. Kuhn H, Medlin D. SAM Handbook, Mechanical Testing and Evaluation, Vol. 8[M]. Materials Park, OH: ASM International, 2000:488-496.
- [4] Subhash G, Ravichandran G. Split-Hopkinson pressure bar testing of ceramics[A]. Kuhn H, Medlin D. SAM Handbook, Mechanical Testing and Evaluation, Vol. 8[M]. Materials Park, OH: ASM International, 2000:497-504.
- [5] Nemat-Nasser S, Isaacs J B, Starrett J E. Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1991,435(1894):371-391.

- [6] Ravichandran G, Subhash G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing of ceramics in a split Hopkinson pressure bar[J]. *J Am Ceram Soc*, 1994,77(1):263–267.
- [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] 王礼立,朱兆祥. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社,1985.
- [9] Gorham D A, Pope D H, Field J E. An improved method for compressive stress-strain measurements at very high strain rates[J]. *Proceedings of the Royal Society London, Series A*, 1992,438:153–179.
- [10] 宋力,胡时胜. 一种用于软材料测试的改进 SHPB 装置[J]. *实验力学*, 2004,19(4):448–452.
SONG Li, HU Shi-sheng. A modified SHPB device for soft material testing[J]. *Experimental Mechanics*, 2004, 19(4):448–452.

Stress uniformity and constant strain rate in SHPB test

SONG Li^{*}, HU Shi-sheng

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

Abstract: The stress uniformity in split Hopkinson pressure bar (SHPB) test is analyzed in detail by using one-dimensional stress wave theory. The influence of related experimental parameters is evaluated. The advantages and disadvantages of some typical loading waveform are discussed. For brittle material testing, the governing equation of input waveform for attaining constant strain-rate loading is given. The strain-rate limitation of SHPB test under certain stress equilibrium condition is analyzed and some new conclusion is given. The method for experimental data analysis of SHPB for better accuracy is also discussed. A qualitative analysis of uniformity and the wanted loading waveform have been done for testing elastic-plastic material made by diagrammatic method. The result indicates that for elastic-plastic material, the strain uniformity should be considered.

Key words: solid mechanics; stress uniformity; one-dimensional stress wave theory; SHPB; constant strain-rate

* Corresponding author: SONG Li
E-mail address: songlee@mail.ustc.edu.cn
Telephone: 0551-3601249