

SHPB 试验中合理加载波形比选分析*

平琦^{1, 2, 3}, 吴明静^{1, 3}, 马芹永^{1, 2, 3}, 袁璞^{1, 3}, 张欢^{1, 3}

(1. 安徽理工大学 矿山地下工程教育部工程研究中心,安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室,安徽 淮南 232001; 3. 安徽理工大学 土木建筑学院,安徽 淮南 232001)

摘 要:针对 SHPB 试验中如何选择合理加载波形问题,将矩形波、坡形波、三角波和常规梯形波等入射波形统一表达为不同升时的梯形波,并给出其加载应力路径方程。首先,计算分析了加载持续时间和最大应力幅值相同情况下,采用不同升时梯形波和半正弦波加载时,试件应力平衡时间 t'_u 随波阻抗比 β 变化情况,以及不同 β 的试件应力均匀性变化特征。其次,从试件应力平衡时间和应力均匀性角度分析两种加载波形的优劣性。升时 $t'_r=2、4$ 的梯形波优于半正弦波,半正弦波优于 $t'_r\geq 7$ 的梯形波;而 $t'_r=0、1、3、5、6$ 的梯形波与半正弦波加载时 t'_u 曲线变化过程中出现了交叉现象,交叉前半正弦波优于此升时的梯形波,交叉后两者优劣性相反。最后,提出试验中合理加载波形的选择与确定。即无论 β 为何值, $t'_r=2$ 或 4 的梯形波加载时,试件均能获得较短应力平衡时间和较好应力均匀性,试验中应将 $t'_r=2$ 的梯形波作为最佳加载波形优先选用,其次可考虑选用 $t'_r=4$ 的梯形波;此外,计算给出不同 β 值对应的其他合理加载波形以便试验中选用。

关键词:一维应力波;梯形波;半正弦波;应力平衡时间;分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)

中图分类号:O347.4 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2017)06-1499-07

Comparison and Analyses on Reasonable Loading Waveform in SHPB Experiment

Ping Qi^{1,2,3}, Wu Mingjing^{1,3}, Ma Qinyong^{1,2,3}, Yuan Pu^{1,3}, Zhang Huan^{1,3}

(1. Ministry of Education's Engineering Research Center of Mine Underground Projects, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, P.R. China; 2. Key Laboratory Being Built by Anhui Province and Ministry of Education for Coal Mine Safety and Efficient Exploitation; Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, P.R. China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, P.R. China)

Abstract: Aiming at the selection of reasonable loading waveform for incident waves in SHPB experiment, rectangular wave, sloping wave, triangular wave and traditional trapezoidal wave were uniformly expressed as trapezoidal wave with different rising times. Moreover, the equations for loading stress path were also given. Firstly, when the loading duration and maximum stress amplitude of trapezoidal wave and half-sine wave are the same, the changes of time for stress equilibrium t'_u over wave impedance ratio β have been analyzed, and the changing characteristics of stress uniformity for different wave impedance ratios β have also been investigated. Then, advantages and disadvantages for trapezoidal wave and half-sine wave are studied according to time for stress equilibrium and stress uniformity. Trapezoidal wave with rising time t'_r of 2 or 4 is superior to half-sine wave, while half-sine wave is superior to trapezoidal wave with rising time bigger than or equal to 7. When rising time of trapezoidal wave is 0, 1,

* 收稿日期:2017-08-02(修改稿)
作者简介:平琦(1975-),男,安徽淮南人,博士后,副教授,硕士生导师,主要从事岩石力学和爆破理论与技术等领域教学与科研工作。E-mail:ahpingqi@163.com
基金项目:国家自然科学基金(51674008);安徽省博士后基金(2015B058);安徽高校省级自然科学研究重点项目(KJ2013A085)

3, 5 or 6, there is a crossover phenomenon in time for stress equilibrium t'_u between trapezoidal wave and half-sine wave. Before crossover, half-sine wave is superior to trapezoidal wave. While after crossover, trapezoidal wave is superior to half-sine wave. Finally, reasonable loading waveform for SHPB experiment is put forward. Trapezoidal wave with rising time t'_r of 2 or 4 presents short time for stress equilibrium and fine stress uniformity, whatever wave impedance ratios β is. In SHPB experiment, the best and first choice of loading waveform is trapezoidal wave with rising time t'_r of 2. Second choice is trapezoidal wave with rising time t'_r of 4. Furthermore, other reasonable loading waveforms for different wave impedance ratios β are also given, which can be easily choose in experiment.

Keywords: one-dimensional stress wave; trapezoidal wave; half-sine wave; time for stress equilibrium; split Hopkinson pressure bar (SHPB)

0 引言

分离式 Hopkinson 压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 试验装置, 是利用高速撞击时产生的应力波来研究材料动态力学性能^[1]。经过 60 多年的发展, 目前已成为研究高应变率 ($10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$) 材料动力学性能中最基本的一种试验手段并得到广泛应用^[2]。

SHPB 试验研究对象已由最初的金属、高聚物等波阻抗较高材料, 拓展到岩石、混凝土、陶瓷等脆性材料和橡胶、肌肉、泡沫、塑料等软材料^[2-5]。脆性材料破坏应变很小, 在很短的加载时间内试件尚未达到应力平衡就可能发生了破坏; 而软材料波阻抗相对较低, 试件尚未达到应力平衡整个加载过程就可能已经结束^[6-7]。出现上述两种情况时, 测得试验数据将会因不满足 SHPB 试验技术应力均匀性 (应力平衡) 的基本假定而丧失有效性。

SHPB 试验中, 圆柱形撞击杆以一定速度撞击入射杆时, 产生入射应力波加载持续时间 $T = 2L_0/C_0$ 和应力幅值 $\sigma_I(t) = \rho_0 C_0 v^*/2$, 可通过调整撞击杆长度 L_0 和撞击速度 v^* 进行控制 (ρ_0 、 C_0 为撞击杆材料密度和纵波速)^[1]; 而入射加载波形可以通过整形技术实现。目前, SHPB 试验波形整形技术可以归纳为两种: 一是使用不同介质整形器^[8], 包括双试件法^[9]; 二是选择特殊形状的撞击杆, 如纺锤形或锥形冲头等^[10]。这两种方法都会延缓入射波上升沿时间, 但整形后的波形却有本质区别, 前者形成不同升时的梯形波, 后者将产生半正弦波。

SHPB 试验中的入射波形和试件-压杆波阻抗比的变化都会影响试件应力/应变分布状况^[11-12]。具体 SHPB 试验中, 压杆和试件的基本物理参数通常是相对已知的, 即试件-压杆波阻抗比确定情况下, 如何保证试件在较短加载时间内达到应力平衡, 选择合理加载波形尤为重要。

一般情况下, SHPB 试验中试件应力均匀性问题主要表现在入射加载的前期^[7, 13]。因此, 讨论分析不同加载波形及其上升沿时间的变化对试件应力平衡时间的影响规律, 具有十分重要的意义。

1 SHPB 试验中常用加载波形

SHPB 试验常用入射加载波形一般有矩形波、梯形波、坡形波和三角波, 以及半正弦波 (有时称为“钟形波”) 等不同形状^[14-15]。

常规梯形波加载应力路径一般由上升沿、应力平台和下降沿等三部分组成, 通常认为上升沿时间 (简称“升时”) 与下降沿的时间相等, 如图 1 所示。

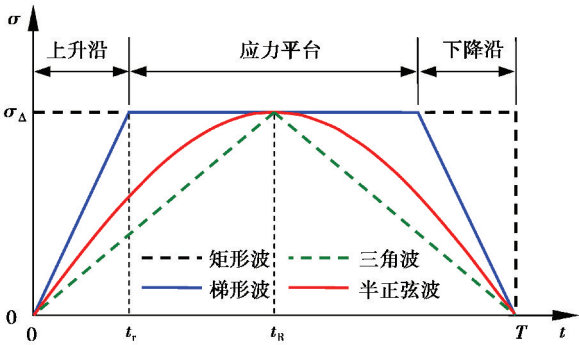


图 1 不同加载波形的应力路径

Fig.1 Stress path under different loading waves

若令矩形波、坡形波、三角波和梯形波等波形加载持续时间 T 和最大应力幅值 σ_A 均相同, 则可以统一用不同升时的梯形波进行表达。即升时 $t_r = 0$ 为矩形波, t_r 大于敏感时段为坡形波, t_r 介于这两者之间为常规梯形波, 其中 $t_r = T/2$ 为三角波。因此, 上述波形可仅视为梯形波的升时不同, 其加载应力路径方程如式 (1) ~ 式 (2) 所示:

当 $t_r = 0$ 时,

$$\sigma_I(t) = \sigma_A, \quad 0 \leq t \leq T \tag{1}$$

当 $0 < t_r \leq T/2$ 时,

$$\sigma_I(t)=\begin{cases}\frac{\sigma_A}{t_r}t,0\leq t\leq t_r\\ \sigma_A,t_r\leq t\leq T-t_r\\ \frac{\sigma_A}{t_r}(T-t),T-t_r\leq t\leq T\end{cases}\quad(2)$$

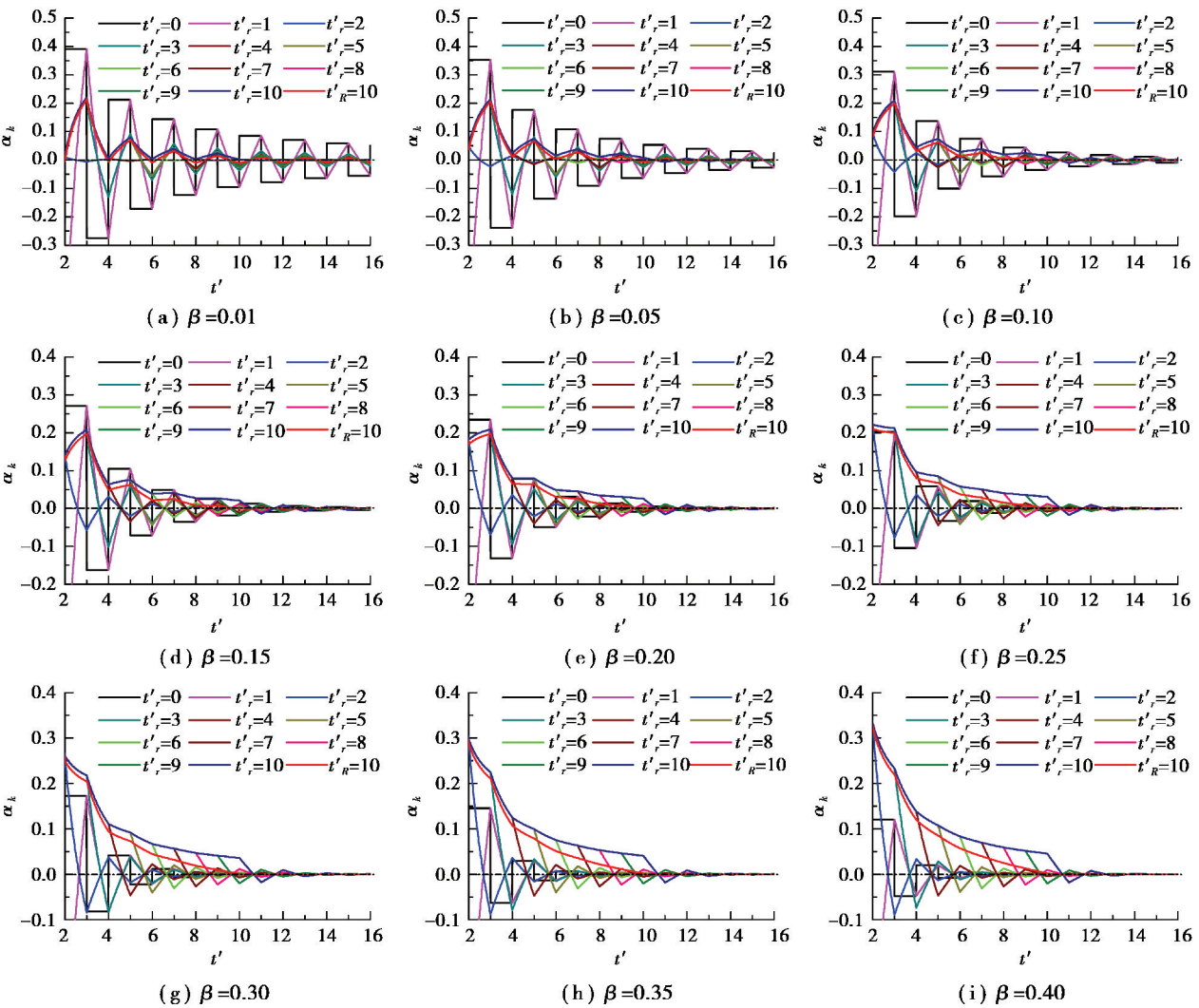
文献[16]给出半正弦加载应力路径方程,若加载持续时间和最大应力幅值均与梯形波相同,则:

$$\sigma_I(t)=\sigma_A\sin\left(\frac{\pi}{T}t\right),0\leq t\leq T\quad(3)$$

其加载应力路径如图1所示。从图可以看出,半正弦波的应力路径中没有应力平台,只有上升沿和下降沿,且时间相等。当 T 和 σ_A 确定时,半正弦波的波形和升时也随之确定,具有唯一性。

综上所述,可将SHPB试验中常用加载波形归纳为不同升时梯形波和半正弦波两种。为便于区分,两者的升时用 t_r 和 t_R 表示,则无量纲升时为 t'_R 和 t'_r 。

2 加载波形的对比分析



2.1 试件应力平衡时间

SHPB 试验中,应力均匀性系数 α_k 为试件两端应力之差与其平均值之比,描述试件内沿加载方向应力分布均匀化程度^[17-18]。 $|\alpha_k|\leq 5\%$ 时,一般近似地认为试件内的应力分布满足应力均匀性要求^[19],即试件两端应力达到了平衡状态。因此,定义满足这一条件所需最短时间为应力平衡时间 t_u ,则 $t'_u=t_u/\tau_s$ 为无量纲应力平衡时间。

假设入射应力波加载持续时间 $T=20\tau_s$,这并不失普遍性^[20]。计算不同升时梯形波($t'_r\leq 10$ 的自然数)和半正弦波($t'_R=10$)入射加载时,试件应力均匀性和应力平衡时间变化情况如图2和图3所示。

2.2 试件应力均匀性分析

图2为不同 β (试件与压杆的弹性波阻抗比值,简称“波阻抗比”)试件,分别采用不同升时梯形波和半正弦波加载时, α_k 变化时程曲线(α_k - t' 曲线),计算中 $\Delta t'=0.01$ 。

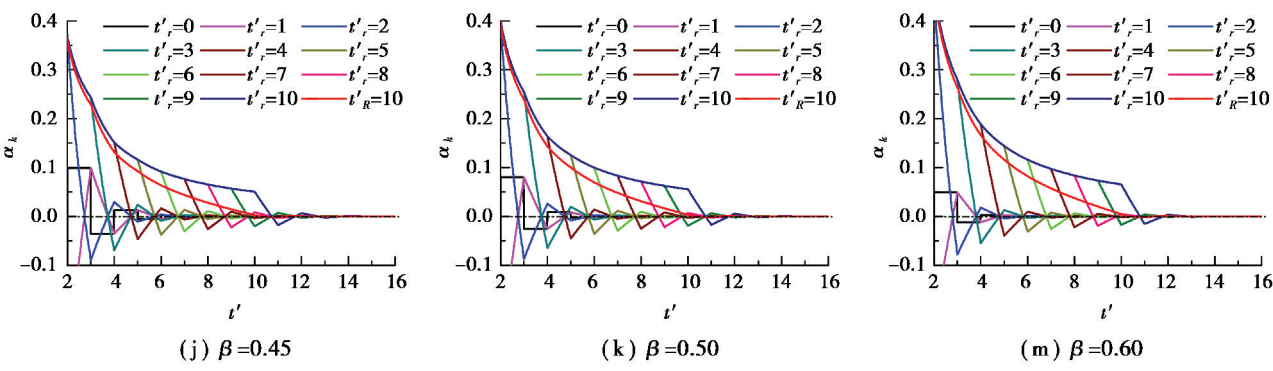


图2 试件应力均匀性系数 α_k 变化时程曲线 ($\alpha_k - t'$ 曲线)

Fig.2 Time history of stress uniformity coefficient α_k for rock specimen ($\alpha_k - t'$ curve)

从图2中(a)~(m)可以看出, $t'_r=0$ 的梯形波加载时, α_k 曲线呈上下跳跃式平台状。即曲线在 $t' \in [n, n+1)$ 内为平台状, 并在 $t'=n$ (n 为正整数) 处发生跳跃 (n 为奇数时曲线向下突变, n 为偶数时曲线向上突变), 且平台幅值逐渐向0靠近。

$t'_r=1$ 的梯形波加载时, α_k 曲线整体呈锯齿状。曲线在 $t'=n$ 处形成上下交替的尖峰 (n 为奇数时尖峰向上, n 偶数时尖峰向下), 且尖峰的幅值与 $t'_r=0$ 的梯形波 α_k 曲线平台幅值 (突变之前) 相同。

$t'_r \geq 2$ 的梯形波加载时, 当 $t' \leq t'_r$ 时, α_k 曲线变化规律一致, 曲线簇完全重合; 在 $t'=t'_r$ 之后变化为近似直线急剧下降, 并在 $t'=t'_r+1$ 处形成向下尖峰; 随后, 在 $t'=n$ ($n \geq t'_r+1$) 处形成上下交替的尖峰, 变为锯齿状, 且尖峰方向与 t'_r 和 n 的奇偶性有关。若 t'_r 为奇数, n 为奇数时尖峰向上, n 为偶数时尖峰向下; 若 t'_r 为偶数, n 为奇数时尖峰向下, n 为偶数时尖峰向上。

半正弦波加载时, 当 $2 \leq t' \leq 10$ 时, α_k 曲线位于 $t'_r=10$ 梯形波加载 α_k 曲线下方, 且下降速度有所加快。当 $t' \geq 10$ 时, α_k 曲线在 $t'=n$ ($n \geq 10$) 处蜕变尖峰, 随 β 值的增大尖峰逐渐变化为弧线; 与 t'_r 为奇数的梯形波 α_k 曲线尖峰方向一致, 且在同向尖峰中其幅值 $|\alpha_k|$ 最小。

其实, 当 $t' \leq 1$ 时, 半正弦波加载 α_k 曲线与不同升时的梯形波加载 α_k 曲线簇重合; 当 $1 \leq t' \leq 2$ 时, 半正弦波加载 α_k 曲线与 $t'_r \geq 2$ 的梯形波 α_k 曲线簇重合。

β 较小时, 半正弦波加载 α_k 曲线与不同升时梯形波加载 α_k 曲线簇变化规律相近, 如图2(a)~(e)所示; 随 β 增大, 半正弦波加载 α_k 曲线由上下波动的下降曲线逐渐变化为光滑下降曲线, 随后与0接近。

2.3 试件应力平衡时间分析

图3为不同升时梯形波和半正弦波加载时, 试件应力平衡时间 t'_u 随波阻抗比 β 变化情况曲线 ($t'_u - \beta$ 曲线), 计算中 $\Delta\beta = 0.01$ 。图中的点线图 (Line+Symbol) 和线形图 (Line) 分别表示不同升时梯形波和半正弦波加载情况。

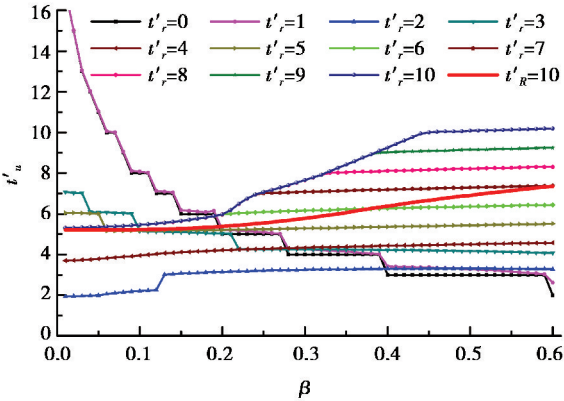


图3 试件应力平衡时间 t'_u 随波阻抗比 β 变化情况曲线 ($t'_u - \beta$ 曲线)

Fig.3 Changes of time for stress equilibrium t'_u with wave impedance ratio β ($t'_u - \beta$ curve)

从图3可以看出, 采用半正弦波加载时, t'_u 曲线变化情况相对比较简单, 曲线总体呈上升趋势, 且随 β 值的增大曲线上升速度略有加快。采用不同升时梯形波加载时, t'_u 曲线变化情况比较复杂, 但仍有一定的规律可循。

$t'_r=0, 1, 3, 5$ 时, t'_u 曲线总体呈下降趋势, 且随 β 增大下降速度变缓。 $t'_r=0, 1$ 的2条 t'_u 曲线变化规律基本一致, 且 $t'_r=0$ 的 t'_u 曲线一直略低于 $t'_r=1$ 的 t'_u 曲线。 $t'_r=5$ 的 t'_u 曲线则表现为先降后升, 在 $\beta \geq 0.08$ 处曲线开始缓慢上升, 但增幅不大 (最大增幅为6.8%)。

$t'_r=2, 4$ 时, t'_u 曲线呈缓慢上升趋势 (除 $t'_r=2$ 、

$\beta=0.12\sim0.13$ 时,出现一次快速上升外),但整体幅值不大。 $t'_r=2$ 时, $t'_u=1.93\sim3.28$; $t'_r=4$ 时, $t'_u=3.69\sim4.57$ 。

$t'_r\geq6$ 时, t'_u 曲线整体呈上升趋势,且变化规律极为相似。当 $\beta\leq0.2$ 时,5 条 t'_u 曲线完全重合,不受 t'_r 值的变化影响,即无论 t'_r 为何值 t'_u 都相同;重合曲线段内随 β 增大曲线上升速度略有加快。当 $\beta>0.2$ 时,5 条 t'_u 曲线依次在 $\beta=0.21、0.25、0.33、0.39、0.45$ 处脱离重合曲线,且 t'_r 值越小,脱离重合曲线的 β 值也越小;随后,曲线变为缓慢上升的近似直线, t'_r 值越大越接近水平线,即在近似直线段内 t'_u 受 β 变化影响微小。

对不同升时梯形波加载,除 $t'_r=2、4$ 以外的 t'_u 曲线簇在 $\beta=0.15\sim0.21$ 之间出现一次紧缩现象,即 t'_r 无论为何值, $t'_u=5.18\sim6.18$ 。

2.4 两种加载波形的对比分析

纵观图 2 和图 3,对比不同升时梯形波和半正弦波加载时 α_k 和 t'_u 变化曲线。

2.4.1 $t'_r=2、4$ 的梯形波与半正弦波加载

从图 2 可以看出, $t'_r=2、4$ 的梯形波加载,当 β 较小时, α_k 曲线在 0 值附近上下波动,如图 2 中(a)所示;随 β 增大, α_k 曲线波动的初始幅值 $|\alpha_k|$ 增加,但上下交替尖峰处的 $|\alpha_k|$ 明显小于其他升时梯形波或半正弦波加载情况($\beta\geq0.35$ 时, $t'_r=0、1$ 的梯形波除外),且 $t'_r=2$ 的梯形波加载的 $|\alpha_k|$ 均小于 $t'_r=4$ 的梯形波加载情况,如图 2 中(b)~(f)所示。这说明采用 $t'_r=2、4$ 的梯形波加载,试件的应力均匀性较好,且 $t'_r=2$ 的梯形波加载最好。

图 3 中, $t'_r=2、4$ 的梯形波加载 2 条 t'_u 曲线一直位于半正弦波加载 t'_u 曲线的下方,说明此升时的梯形波优于半正弦波加载。即无论 β 为何值,采用 $t'_r=2、4$ 的梯形波加载均能获得较短应力平衡时间。

2.4.2 $t'_r\geq6$ 的梯形波与半正弦波加载

从图 2 可以看出, $t'_r\geq6$ 的梯形波加载时,随 β 的增大, α_k 曲线初始幅值 $|\alpha_k|$ 增大。当 β 值较小时,曲线簇相差不明显,曲线簇的整体幅值与 0 接近,如图 2(a)~(d)所示; β 较大时, α_k 曲线的波动幅度增加明显,且 t'_r 越大, α_k 曲线接近 0 的时间越晚,如图 2(e)~(m)所示。这说明, β 较小时,试件应力均匀性较好; β 较大时,试件应力均匀性变差,且 t'_r 越大,试件应力均匀性越差。

图 3 中, $t'_r\geq6$ 的梯形波加载的 5 条 t'_u 曲线一直位于半正弦波加载 t'_u 曲线上方($t'_r=6,\beta\geq0.38$

时除外),这说明半正弦波优于此升时的梯形波加载。此时的梯形波可视为坡形波,当 $t'_r=10$ 时为三角波。

2.4.3 $t'_r=0、1、3、5$ 的梯形波与半正弦波加载

从图 2 可以看出, $t'_r=0、1$ 的梯形波加载时, α_k 的起始幅值随 β 增大而减小。 $\beta\leq0.15$ 时, $|\alpha_k|$ 大于其他升时的梯形波或半正弦波加载情况,如图 2(a)~(d)所示; $\beta\geq0.25$ 时, $|\alpha_k|$ 小于其他升时的梯形波和半正弦波加载情况,如图 2(f)~(m)所示。这说明,随 β 的增大,试件应力均匀性较好。其实, $t'_r=0、1$ 的梯形波并无本质差别,因而 $t'_r=1$ 的梯形波也可视为近似的矩形波。

$t'_r=3、5$ 的梯形波加载时,随 β 值的增大, α_k 曲线的初始幅增大,其变化规律与 $t'_r\geq6$ 的梯形波加载时的 α_k 曲线相似。且 $\beta\geq0.1$ 时,试件应力均匀性优于 $t'_r\geq6$ 的梯形波加载情况,如图 2(b)~(m)所示。

从图 3 可以看出, $t'_r=0、1、3、5$ 的梯形波加载的 4 条 t'_u 曲线分别在 $\beta=0.20$ ($t'_r=0、1$), 0.10 ($t'_r=3$), 0.06 ($t'_r=5$) 处附近与半正弦波加载 t'_u 曲线发生了交叉, t'_r 值越小,曲线交叉时的 β 值也越大。交叉前半正弦波优于梯形波;交叉后梯形波优于半正弦波。

2.5 试验中合理加载波形的选择与确定

综上所述,SHPB 试验中无论 β 为何值时,可优先考虑将 $t'_r=2$ 的梯形波作为最佳加载波形,其应力均匀性最好,应力平衡时间最短, $t'_u=1.93\sim3.28$;其次考虑选择 $t'_r=4$ 的梯形波,其应力均匀性较好,应力平衡时间较短, $t'_u=3.69\sim4.57$ 。

除 $t'_r=2、4$ 的梯形波外,试验中也可根据 β 值大小选择其他加载升时梯形波或半正弦波,也能获得较短应力平衡时间和较好应力均匀性。计算不同 β 对应加载波形及其应力平衡时间等有关结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,以 $0.01\leq\beta\leq0.05$ 为例,若选择半正弦波或 $t'_r\geq6$ 的梯形波作为加载波形,试件的应力平衡时间 t'_u 分别为 5.21 和 5.31~5.35,即应力波在试件两端之间传播 3 个来回($t'_u\leq6$),试件内的应力便达到了均匀性的要求;若选择 $t'_r=5、3、0、1$ 的梯形波作为加载波形,试件的应力平衡时间 t'_u 分别为 6.01~6.05、6.08~7.07、11.00~17.00 和 11.04~17.02,即应力波在试件两端之间传播 4~9 个来回时,试件内的应力才能达到均匀性的要求,所需要应力平衡时间较长。

表 1 其他加载波形及其应力平衡时间查值表

Table 1 Look-up table for other loading waveform and time for stress equilibrium

$0.01 \leq \beta$ ≤ 0.05	$0.06 \leq \beta$ < 0.10	$0.10 \leq \beta$ < 0.20	$0.20 \leq \beta$ < 0.28	$0.28 \leq \beta$ ≤ 0.60
半正弦波 5.21	$t'_r = 5$ 5.16~5.17	$t'_r = 3$ 5.04~5.15	$t'_r = 3$ 4.26~5.03	$t'_r = 0$ 2.00~4.00
$t'_r \geq 6$ 5.31~5.35	半正弦波 5.21	$t'_r = 5$ 5.17~5.20	$t'_r = 0$ 5.00	$t'_r = 1$ 2.61~4.28
$t'_r = 5$ 6.01~6.05	$t'_r \geq 6$ 5.37~5.43	半正弦波 5.22~5.35	$t'_r = 1$ 5.01~5.22	$t'_r = 3$ 4.07~4.25
$t'_r = 3$ 6.08~7.07	$t'_r = 3$ 6.01~6.07	$t'_r \geq 6$ 5.46~5.89	$t'_r = 5$ 5.21~5.26	$t'_r = 5$ 5.27~5.51
$t'_r = 0$ 11.00~17.00	$t'_r = 0$ 8.00~10.00	$t'_r = 0$ 6.00~8.00	半正弦波 5.38~5.64	半正弦波 5.68~6.00 ($\beta \leq 0.34$ 时) 6.06~7.35 ($\beta \geq 0.35$ 时)
$t'_r = 1$ 11.04~17.02	$t'_r = 1$ 8.11~10.06	$t'_r = 1$ 6.14~8.07	$t'_r \geq 6$ 5.97~7.29	$t'_r \geq 6$ 6.13~10.19

注：①表中未包含 $t'_r = 2, 4$ 的梯形波，仅注明升时 t'_r 的为梯形波；
②表中虚线上方为可选用波形，虚线下方波形尽量避免使用。

同理,当 $0.28 \leq \beta \leq 0.60$ 时,可依次考虑选择 $t'_r = 0, 1, 3, 5$ 的梯形波作为加载波形,且 $t'_r = 0$ 的梯形波(矩形波)具有明显的优势。其中,当 $0.28 \leq \beta \leq 0.34$ 时,还可考虑选择半正弦波作为加载波形。

3 结论

将 SHPB 试验中常见的矩形波、坡形波、三角波和常规梯形波等统一表达为不同升时梯形波,并给出加载应力路径方程。计算分析了加载持续时间 $T = 20$ 和最大应力幅值 σ_A 相同情况下,采用不同升时梯形波($t'_r \leq 10$)和半正弦波($t'_R = 10$)进行入射加载时,试件应力平衡时间 t'_u 随波阻抗比 β 的变化情况。

(1) 采用不同升时梯形波加载, $t'_r = 0, 1, 3, 5$ 时, t'_u 曲线簇总体呈下降趋势,且随 β 增大下降速度变缓; $t'_r = 2, 4$ 时, t'_u 曲线簇呈缓慢上升趋势,但整体幅值不大; $t'_R \geq 6$ 时, t'_u 曲线簇整体呈上升趋势,且随 β 增大依次变为缓慢上升的近似直线。

(2) 从试件应力平衡时间和应力均匀性角度分析不同升时梯形波和半正弦波加载波形优劣性。 $t'_r = 2, 4$ 的梯形波优于半正弦波,半正弦波优于 $t'_r \geq 7$ 的梯形波;而 $t'_r = 0, 1, 3, 5, 6$ 的梯形波 t'_u 曲线簇与半正弦波加载时 t'_u 曲线变化过程中出现了交叉现象,交叉前半正弦波优于此升时的梯形波,交叉后两者优劣性相反。

(3) 试验中无论为 β 值时,可优先考虑将 $t'_r = 2$ 的梯形波作为最佳加载波形,其应力均匀性最好, $t'_u = 1.93 \sim 3.28$;其次考虑选择 $t'_r = 4$ 的梯形波,其应力均匀性较好, $t'_u = 3.69 \sim 4.57$ 。除此之外,试验中可根据 β 值选择其他加载升时的梯形波或半正弦波,也能获得较短应力平衡时间和较好应力均匀性。

参考文献 (References)

[1] 王礼立. 应力波基础(第 2 版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. (Wang Lili. Foundation of stress waves (2nd ed). [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese))

[2] 胡时胜, 王礼立, 宋力, 等. Hopkinson 压杆技术在中国的发展回顾[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(6): 641-657. (Hu Shisheng, Wang Lili, Song Li, et al. Review of the development of Hopkinson pressure bar technique in China[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(6): 641-657. (in Chinese))

[3] 方秦, 洪建, 张锦华, 等. 混凝土类材料 SHPB 实验若干问题探讨[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 1-14, 26. (Fang Qin, Hong Jian, Zhang Jinhua, et al. Issues of SHPB test on concrete-like material[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(5): 1-14, 26. (in Chinese))

[4] 张方举, 何鹏, 胡文军, 等. 软材料的低阻抗 SHPB 实验技术与应用[J]. 中国测试, 2012, 38(2): 17-20. (Zhang Fangju, He Peng, Hu Wenjun, et al. Application and experimental technique of low impedance SHPB for soft materials [J]. China Measurement & Test, 2012, 38(2): 17-20. (in Chinese))

[5] 王宝珍, 胡时胜. 肌肉类粘弹性超软材料 SHPB 实验的应力应变均匀性分析[J]. 实验力学, 2011, 26(4): 377-382. (Wang Baozhen, Hu Shisheng. Analysis of stress and strain uniformity of muscle-like extra-soft viscoelastic material in SHPB experiment [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(4): 377-382. (in Chinese))

- [6] 平琦, 马芹永, 袁璞. SHPB 试验中不同加载升时应力平衡时间对波阻抗比的敏感性[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2128-2134. (Ping Qi, Ma Qinyong, Yuan Pu. Sensitivity of time for stress equilibrium to wave impedance ratio with different rising times in SHPB tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 2128-2134. (in Chinese))
- [7] 宋力, 胡时胜. SHPB 测试中的均匀性问题及恒应变率[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(3): 207-216. (Song Li, Hu Shisheng. Stress uniformity and constant strain rate in SHPB test [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(3): 207-216. (in Chinese))
- [8] 李为民, 许金余. 大直径分离式霍普金森压杆试验中的波形整形技术研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(3): 350-355. (Li Weimin, Xu Jinyu. Pulse shaping techniques for large-diameter split Hopkinson pressure bar test [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(3): 350-355. (in Chinese))
- [9] 陶俊林, 田常津, 陈裕泽, 等. SHPB 系统试件恒应变率加载实验方法研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(5): 413-418. (Tao Junlin, Tian Changjin, Cheng Yuze, et al. Investigation of experimental method to obtain constant strain rate of specimen in SHPB [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(5): 413-418. (in Chinese))
- [10] 李夕兵. 岩石动力学基础及应用[M]. 北京, 科学出版社, 2014. (Li Xibing. Rock dynamics fundamentals and applications [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [11] 王礼立, 王永刚. 应力波在用 SHPB 研究材料动态本构特性中的重要作用[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(1): 17-25. (Wang Lili, Wang Yonggang. The important role of stress waves in the study of dynamic constitutive behavior on materials by SHPB [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(1): 17-25. (in Chinese))
- [12] 平琦, 马芹永, 袁璞. SHPB 试验岩石试件应力平衡时间预估分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(12): 55-60. (Ping Qi, Ma Qinyong, Yuan Pu. Prediction for stress equilibrium time in rock SHPB test [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(12): 55-60. (in Chinese))
- [13] 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 Mingli, Zhang Ruoyi, Zhang Guangying. Analysis of early stage specimen stress equilibrium in SHPB experiment [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(3): 235-240. (in Chinese))
- [14] Xu P. Effect of projectile head style on high gacceleration waveform of Hopkinson bar calibration system [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2015, 6(1): 1-6.
- [15] 方新宇, 许金余, 刘石, 等. 岩石 SHPB 试验中子弹形状对加载波形的数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 1000-1005. (Fang Xinyu, Xu Jinyu, Liu Shi, et al. Numerical simulation on the influence of projectile shape on loading waveform in SHPB tests of rocks [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 1000-1005. (in Chinese))
- [16] 洪亮, 金志仁, 邓宗伟. 花岗岩在 SHPB 冲击破坏实验中最低加载应变率的杆径效应[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(3): 328-333. (Hong Liang, Jin Zhiren, Deng Zongwei. Bar diameter effect of minimum loading strain rate in granite impacting tests by SHPB [J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(3): 328-333. (in Chinese))
- [17] 毛勇建, 李玉龙. SHPB 试验中试件的轴向应力均匀性[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(5): 448-454. (Mao Yongjian, Li Yulong. Axial stress uniformity in specimens of SHPB tests [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(5): 448-454. (in Chinese))
- [18] 平琦, 马芹永, 袁璞. 岩石 SHPB 实验加载过程中应力平衡问题分析[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(6): 655-661. (Ping Qi, Ma Qinyong, Yuan Pu. Stress equilibrium in rock specimen during the loading process of SHPB experiment [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(6): 655-661. (in Chinese))
- [19] 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 Fenghua, Wang Lili, Hu Shisheng. On the effect of stress nonuniformness in polymer specimen of SHPB tests [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1992, 7(1): 23-29. (in Chinese))
- [20] 洪亮. 冲击荷载下岩石强度及破碎能耗特征的尺寸效应研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008. (Hong Liang. Size effect on strength and energy dissipation in fracture of rock under impact loads [D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese))