DOI: 10.11883/bzycj-2017-0361 文章编号: 1001-1455(2018)03-0517-08

单轴双向加载分离式霍普金森压杆的数据处理方法*

聂海亮,石霄鹏,陈春杨,李玉龙
(西北工业大学航空学院,陕西 西安 710072)

摘要: 本文中提出单轴双向加载分离式霍普金森压杆(bidirectional-load split Hopkinson compression bar,BSHCB),即在传统的分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar,SHPB)的基础上增加另一个对称的入射波,两边的入射波同时且对称地对试样进行动态加载。根据一维应力波传播理论,推导出单轴双向加载分离式霍普金森杆的数据处理公式。通过数值模拟分析发现,所推导的数据处理公式可以用于计算单轴双向加载实验中试样的工程应力、工程应变和工程应变率。此外,单轴双向对称加载不仅可缩短试样内部应力均匀化的过程,而且可以提高试样应变率。

关键词: 单轴双向加载;霍普金森压杆;应力均匀性;应变率;数据处理
中图分类号: O347.1 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

霍普金森压杆实验技术自 1914 年被提出以来[1],经历了一百余年,已成为材料动态力学性能测试的一种最重要手段[2-4]。目前广泛使用的技术是 Kolsky[5]在 1949 年提出的一种分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar,SHPB)。传统的 SHPB 通过撞击杆与入射杆的同轴碰撞产生压缩波,沿入射杆传播,并对试样进行加载[6]。SHPB 一般被用来测量材料在高应变率下的塑性流动行为,在加载的最初阶段,试样两端的应力还未达到均匀,实验数据的可信度比较差,导致计算的材料特性在弹性段有部分无效数据。当应力波在试样中来回反射 3~5 个来回后,试样两端的应力达到均匀,实验数据才有效[7]。为了测量波阻抗较低的软材料,Wang 等[8]提出用波阻抗较低的聚合物杆取代传统的金属杆。Hou 等[9]提出了一种用于测量泡沫材料动态压剪力学性能的 SHPB 装置,将入射杆和透射杆与试样的接触端面改为斜面以产生压剪效应。崔云霄等[10]在此基础上设计了一种双透射杆的 SHPB 装置。这些改进都收到了良好的效果。鉴于传统 SHPB 加载方式中单向加载对试样内部应力平衡的影响,本文中提出一种单轴双向加载分离式霍普金森压杆(bidirectional-load split Hopkinson compression bar,BSHCB)实验技术,即在传统 SHPB 的基础上增加另一个对称的入射波,两边的入射波同时且对称地对试样进行动态加载。基于一维应力波传播理论,推导出单轴双向加载分离式霍普金森杆的数据处理公式,并通过有限元模拟对公式的可靠性进行验证。

1 加载方式及数据处理公式

1.1 实验加载原理

BSHCB 装置如图 1 所示。在传统的 SHPB 装置的基础上,将透射杆作为另一根入射杆,通过 2 个应力波发生装置从 2 根入射杆端面同时输入 2 个相同的入射波,2 根压杆长度相同,因此 2 个入射波会同时到达试样,对试样进行对称加载。

1.2 数据处理公式推导

记 2 根入射杆分别为杆 1 和杆 2,如图 2 所示。在 2 列入射波 ε_{i1} 和 ε_{i2} 对试样加载过程中,会分别在

* 收稿日期: 2017-10-09; 修回日期: 2017-12-18
基金项目: 国家自然科学基金项目(11527803);上海市科学技术委员会科研计划项目(14DJ1400300)
第一作者: 聂海亮(1988—),男,博士; 通信作者: 李玉龙,liyulong@nwpu.edu.cn。

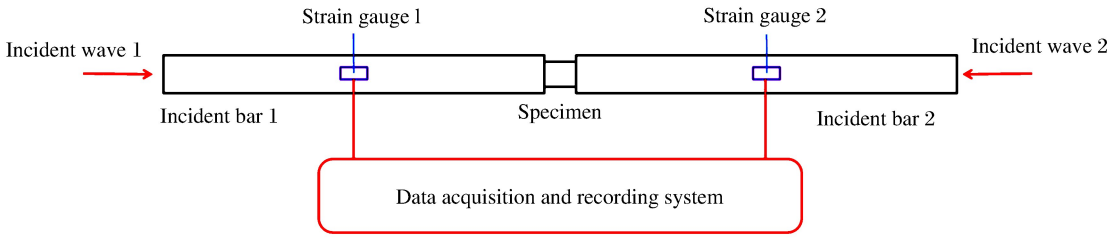


图 1 BSHCB 示意图

Fig. 1 Sketch map of the bidirectional-load split Hopkinson compression bar

相应的入射杆中产生一列与入射波传播方向相反的波，分别记作反射波 ε_1 和 ε_2。

忽略弥散效应等非一维效应，根据应力波理论，端面 1 和端面 2 处的质点速度为：

$$v_1 = c_0(\varepsilon_{i1} - \varepsilon_1), \qquad v_2 = c_0(\varepsilon_2 - \varepsilon_{i2}) \tag{1}$$

于是，试样中的平均工程应变率和平均工程应变分别为：

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_1 - v_2}{l_s} = \frac{c_0}{l_s}(\varepsilon_{i1} + \varepsilon_{i2} - \varepsilon_1 - \varepsilon_2) \tag{2}$$

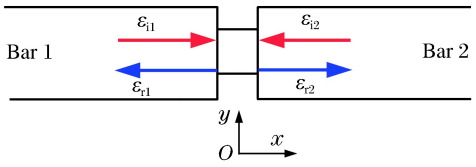


图 2 单轴双向加载实验中应力波的传播示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wave propagation in BSHCB test

$$\varepsilon = \int_0^{t_d} \dot{\varepsilon}\,\mathrm{d}t = \frac{c_0}{l_s}\int_0^{t_d}(\varepsilon_{i1} + \varepsilon_{i2} - \varepsilon_1 - \varepsilon_2)\,\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中：c_0 为压杆中的弹性波速，l_s 为试样的初始长度，t_d 为入射波持续时间。

试样两端的应力分别为：

$$\sigma_1 = \frac{A_b}{A_s}E(\varepsilon_{i1} + \varepsilon_1), \qquad \sigma_2 = \frac{A_b}{A_s}E(\varepsilon_{i2} + \varepsilon_2) \tag{4}$$

式中：A_b 和 A_s 分别为压杆和试样的横截面积，E 为压杆的弹性模量。

试样内部的应力取两端面的应力平均值：

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \frac{1}{2}\frac{A_b}{A_s}E(\varepsilon_{i1} + \varepsilon_{i2} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2) \tag{5}$$

若两端的加载完全对称，即 $\varepsilon_{i1} = \varepsilon_{i2}$，试样中截面相当于刚壁，将两边分为 2 个对称的子系统，因此有 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$。式(2)、(3)和(5)即简化为：

$$\dot{\varepsilon} = 2\frac{c_0}{l_s}(\varepsilon_{i1} - \varepsilon_1), \qquad \varepsilon = 2\frac{c_0}{l_s}\int_0^{t_d}(\varepsilon_{i1} - \varepsilon_1)\,\mathrm{d}t, \qquad \sigma = \frac{A_b}{A_s}E(\varepsilon_{i1} + \varepsilon_1) \tag{6}$$

式(2)、(3)和(5)适用于单轴双向加载的一般情况下的材料特性计算，式(6)适用于两端加载的入射波完全对称的情况。

2 有限元模拟过程

本节采用商业软件 Abaqus/explicit 模块进行数值模拟，对 BSHCB 的数据处理公式进行验证。

在模拟中，压杆长 1 m，直径为 10 mm。压杆材料为钢，弹性波速为 5 188.75 m/s，密度为 7 800 kg/m^3，杨氏模量为 210 GPa。试样材料为 2024 铝合金，采用 Johnson-Cook 本构模型。Johnson-Cook 本构模型[11]是经验型本构方程，由 2 部分组成：第 1 部分只涉及应力，第 2 部分则涉及断裂时的应变。在本文的模拟中只涉及第 1 部分的内容，von Mises 流动应力 σ_M 的计算公式为：

$$\sigma_M = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}_p^*)(1 - T^{*m}) \tag{7}$$

式中：ε_p 为等效塑性应变，$\dot{\varepsilon}_p^*$ 为相对等效塑性应变率，$\dot{\varepsilon}_p^* = \dot{\varepsilon}_p/\dot{\varepsilon}_0$，$\dot{\varepsilon}_0 = 1.0\ \mathrm{s}^{-1}$，$T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$，$T_m$ 和 T_r 分别为材料的熔化温度和室温。A、B、n、C 和 m 分别为拟合的参数，2024 铝合金的 John-

son-Cook 模型参数：密度，2 770 kg/m^3；杨氏模量，70 GPa；熔化温度，775 ℃；A，265 MPa；B，426 MPa；n，0.34；C，0.015；m，1.00。压缩试样为∅5 mm×5 mm 圆柱形试样。

首先给两边加载脉宽为 150 μs、上升沿为 10 μs、幅值为 300 MPa 的相同的梯形波，通过公式处理和试样上一点处的应力-应变曲线进行比较，来验证公式的正确性。

采用二维轴对称模型以减小计算时间。通过网格敏感性分析，发现当全局网格尺寸约在 0.8 mm 时，网格对结果无影响。由于本文中采用轴对称二维模型，网格数量较少，运算速度较快，为了提高运算精读，将全局网格尺寸设置为 0.2 mm。入射波均以压杆端面上的压强脉冲的形式输入模型。压杆上的应力波信号均取自两根杆轴向中截面处的表面单元，每隔 0.5 μs 取一个数据。

3　结果及分析

3.1　试样内部应力分析

为了验证所推导的数据处理公式的正确性，需知道试样内部实际的工程应力-工程应变曲线。在数值模拟中，拟在试样中心点处上取一个单元的工程应力-工程应变曲线，来代表材料的实际力学特性。为了验证，分别在试样表面、半径一半处以及试样对称轴处各取一组代表单元，分别命名为 Surface、Half 和 Axes，每组代表单元由沿轴向每隔 4 个单元所取的所有单元组成，如图 3(a)所示。将试样中心点处的单元命名为 Center。分别对每组单元的工程应力历程和工程应变历程取平均值，得出平均的工程应力-工程应变曲线。同时，取 Center 单元的工程应力-工程应变曲线进行比较。图 3(b)给出了 3 组单元的平均工程应力-工程应变曲线与 Center 单元的工程应力-工程应变曲线。显然，Center 单元的工程应力-工程应变曲线与 Surface、Half、Axes 的工程应力-工程应变曲线完全重合。因此，可以认为试样中心点处的单元应力状态能够代表试样内部的实际应力状态。因此，在后面的对比中，都取试样中心点处单元的应力状态来代表所模拟的实际应力状态。

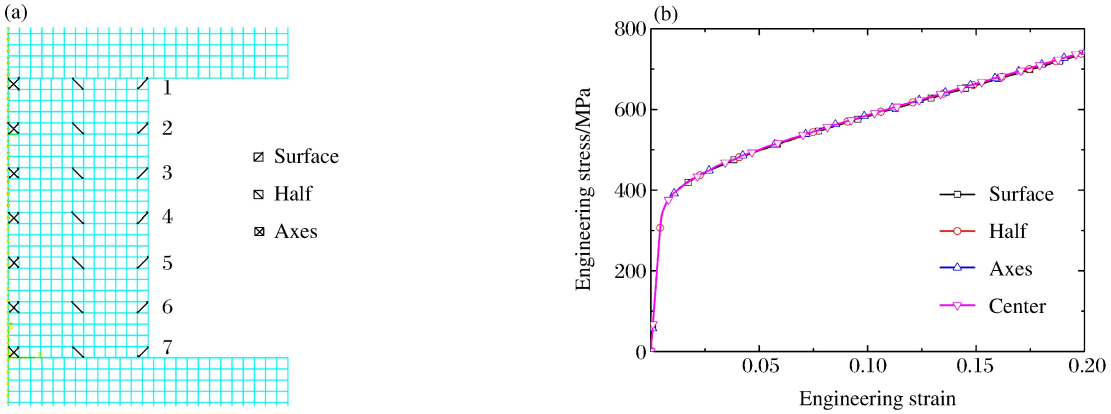


图 3　试样内部单元分组和编号以及试样内部各组单元的平均应力-应变曲线

Fig. 3　Grouping and serial numbers of specimen elements, and average stress-strain curve of each element group

3.2　公式有效性验证

单轴双向对称压缩加载情况为 300 MPa VS 300 MPa 时，在 2 根压杆的中取到的应力波信号如图 4(a)所示。由于是对称加载，2 根杆中所采集的应力波信号完全重合，为了便于观察，将 2 列波在时间上错开。对图 4(a)中所记录的应力波进行移波并保留有用波形，便得到图 4(b)所示的处理波形。

用公式(6)对图 4(b)的数据进行处理，得到 300 MPa VS 300 MPa 时试样的工程应力-工程应变曲线，绘制在图 5 中，并与在试样中心点处的单元上所取的工程应力-工程应变曲线进行对比。很明显，计算的工程应力-工程应变曲线与试样内部的实际工程应力-工程应变曲线几乎完全重合，从而验证了 1.2 节中所推导的对称加载公式的正确性。

在图 4 中，反射波 ε_1 有一部分为拉伸波，一部分为压缩波，这实际上是压杆中的应力波叠加的结

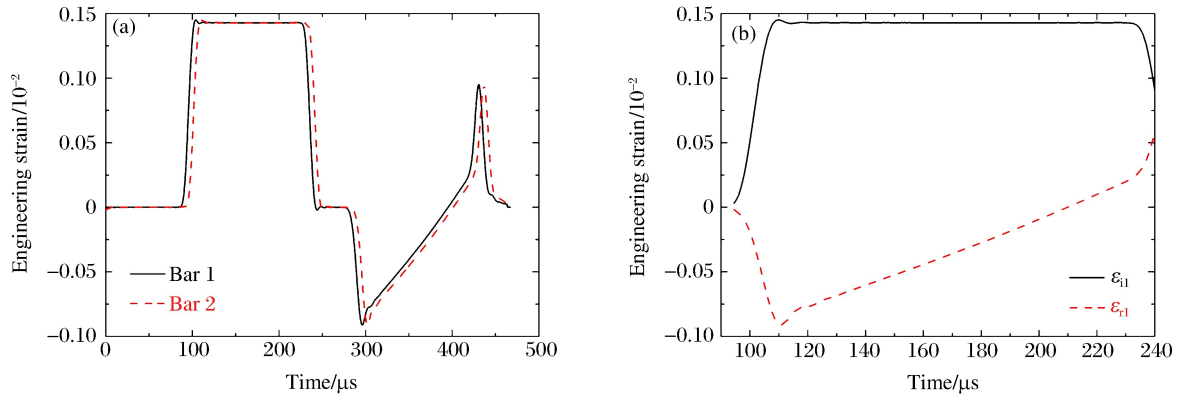


图 4 300 MPa VS 300 MPa BSHCB 模拟中所采集的应力波信号及数据处理所用的波形

Fig. 4 Stress waves and data processing waves used in BSHCB simulation of 300 MPa VS 300 MPa

果。当入射波到达端面 1 时，会产生反射波（拉伸波）和透射波（压缩波），由于对称性，端面 2 处相同，方向相反。当 2 道对称压缩波在试样中心相遇发生相互作用时，由对称性可知，试样中心位移为零（刚壁），将产生 2 道压力更高的压缩波分别向端面处传播（可视为刚壁的反射，也可视为对面透射过来的，但已不是原来那个透射波了），具体增加的幅值取决于材料当时的性质，线弹性时，增加一倍。再经过端面处作用，最后形成杆中的反射波。所以实际中采集到的反射波 ε_1 不是一个单纯的压缩波或拉伸波。

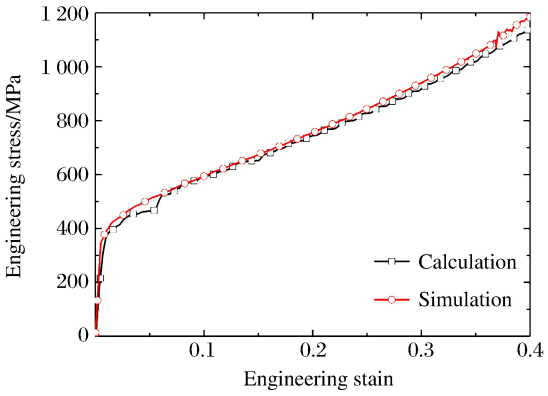


图 5 300MPa VS 300MPa BSHCB 的工程应力-工程应变曲线的计算结果与模拟结果的比较

Fig. 5 Comparison of calculated and simulated stress-strain curves in BSHCB simulation of 300 MPa VS 300 MPa

4 讨 论

在本节的讨论中，对比在入射波形完全相同的情况下，单向加载和双向加载的差异。所用模型参数与第 2 节相同，唯一的区别之处在于，单向加载模拟中只有一个入射波，双向加载时在 2 个入射杆中施加相同的入射波。

4.1 应力均匀性

为了直观地比较单向加载与双向加载方式在试样应力均匀性方面的差异，定义试样内部应力差异因子 α。对于传统的 SHPB 方式，试样两端面的应力差异最大，而对于 BSHCB 方式来说，试样两端的和中截面处的应力差异最大。因此，对于传统的 SHPB 加载方式，$\alpha=|\sigma_1-\sigma_2|/\sigma_e$；而对于 BSHCB 方式，$\alpha=|\sigma_e-\sigma_m|/\sigma_e$；式中 σ_e 为试样的两端面的应力平均值，σ_m 为试样中部截面上的应力平均值。

图 6 为单轴双向加载与常规加载方式中加载初期试样内部的应力分布，在模拟中，单向加载和双向加载所施加的入射波均为梯形波，幅值相同，上升沿为 10 μs。假定 $\alpha<0.05$ 时，试样内部应力达到均

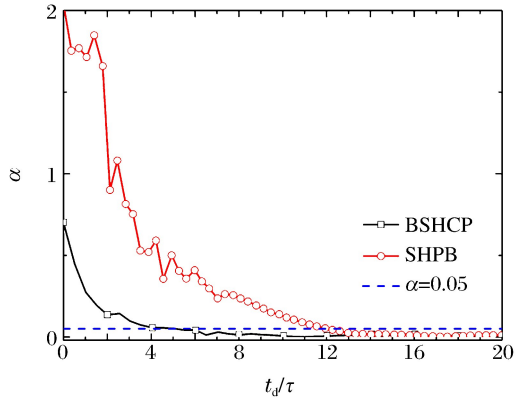


图 6 BSHCB 和传统 SHPB 实验中试样内部的应力均匀性比较

Fig. 6 Comparison of stress equilibrium in specimens of BSHCB and SHPB tests

匀。令 τ 为应力波在试样中传播一个试样长度所用的时间，由试样的材料特性和尺寸可知，$\tau \approx 1\ \mu s$。显然，对于双向加载方式，在约 4τ 后试样内部的应力就达到了均匀分布，而对于传统的单向加载方式，试样在约 12τ 后才基本达到应力均匀状态。因此，双向加载中试样达到应力均匀状态的时间是单向加载的 1/3。这是因为对双向对称加载来说，试样中点为对称不动点，因此试样内部应力波的反射距离仅为试样厚度的 1/2，从而加快了应力均匀化。

由以上分析可知，单轴双向加载方式中，试样能够在更短的时间内达到应力均匀状态。

4.2　应变率的提高

同传统的 SHPB 方式相比，BSHCB 方式因为多了一个入射波，所得到的材料应变率必然会高于比相同载荷下的 SHPB 方式。为了便于比较应变率的提高，应变率-时间曲线应保持基本的恒定。

在双向对称加载中，根据单轴双向加载的试样材料应变率计算公式可知，试样的应变率-时间曲线与入射波和反射波差值的波形有关。结合图 4(b)中的反射波形可知，对于本文所模拟的材料，在入射波为梯形波的情况下，入射波与反射波之差不存在平台段，而是在一个急剧上升的峰值之后出现一个下降的斜坡，因此试样变形的应变率并不是恒定的，而是先急剧增大，再缓慢减小。为了使计算的材料应变率-时间曲线有一个基本恒定的平台段，应该使入射波在上升沿之后有一个缓慢上升的斜坡段，以抵消反射波产生的下降沿斜坡。通过数值模拟的多次尝试，得到了一个使应变率基本恒定的入射波形。图 7(a)为单轴双向对称加载下 2 根压杆上所采集到的应力波信号，图 7(b)为所计算的工程应力-工程应变曲线和工程应变率-工程应变曲线。显然，在图 7(a)的入射波加载条件下，模拟计算所得到的试样工程应变率-工程应变曲线在在材料的塑性变形阶段保持了基本恒定的值。

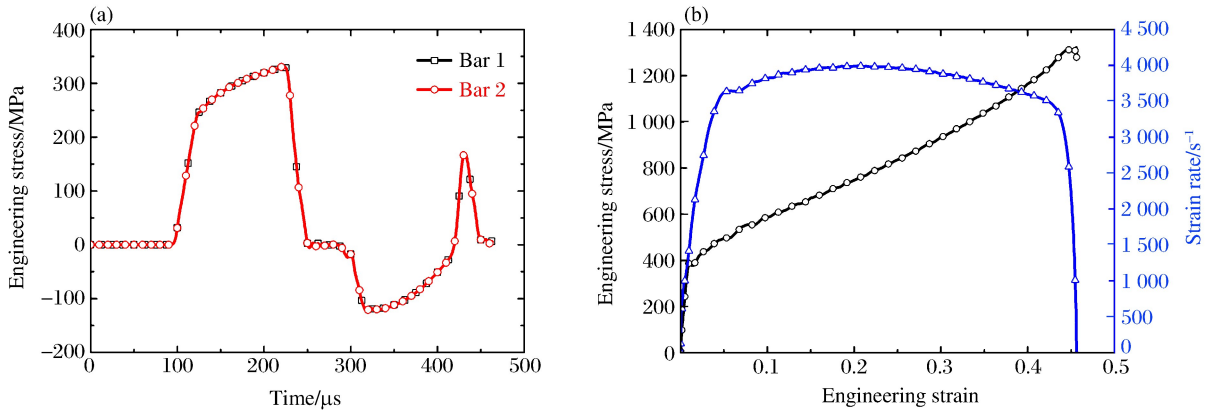


图 7　BSHCB 实验中的恒应变率加载模拟结果

Fig. 7　Simulation results of constant strain-rate loading in BSHCB test

同样的入射波被用于相同条件下的 SHPB 模拟，图 8 对比了 SHPB 加载和 BSHCB 加载的模拟结果。显然，BSHCB 加载的应变率比 SHPB 加载高了一倍左右。

实际上，双向对称加载时，试样的中心面相当于刚壁，从试样长度看，相当于试样长度缩短了一半，故应变率会提高一倍，同时，由于刚壁的强烈反射，应力迅速升高，高应力使得材料应变大幅增加(取决于材料的性能)，因此相同脉宽下，应变率至少提高一倍，甚至更高。

双向对称加载时，由于压杆的屈服强度有限，为了避免压杆中的应力水平超过压杆的屈服极限，对入射波的幅值有特殊的要求。以入射杆 1 为例，在靠近试样的端面，压杆内的应力水平最高为 $2\sigma_1$。为了避免压杆内的应力水平超过压杆材料的屈服极限，BSHCB 加载中的入射波幅值不能超过压杆屈服极限的一半。

4.3　加载不对称的问题

实际中，2 根压杆中的入射波幅值会存在微小差异，绝对对称加载是无法实现的。本节对偏离对称加载的情况进行讨论。本文中所推导的数据处理公式允许 2 个入射波存在不对称性。当两边入射不对

称时，采用公式(2)、(3)和(5)即可处理。

对于加载幅值的不对称，在模拟中令一边的梯形入射波的脉宽为150 μs、上升沿为10 μs、幅值为300 MPa，保持不变，而另一边的入射波幅值减小 ΔA。图9(a)所示为 ΔA 分别等于0%、10%、20%、30%、40%以及50%时所得到的数值实验结果。可以看出，当两端加载的入射波幅值存在差异时，实际上是改变了试样的应变率。差异越大对应变率的改变越大。由于试样材料对应变率不敏感，所以在图9(a)中，应变率的不同体现在最大应变的差异上。模拟中给出的最大幅值误差为50%，而在实际中，两端加载波的幅值差异不可能这么大。以上分析可知，单轴双向加载中允许两端的加载波幅值存在差异。当两端加载波幅值存在差异时，仅仅影响所测材料的应变率，而不会对数据的有效性造成影响。

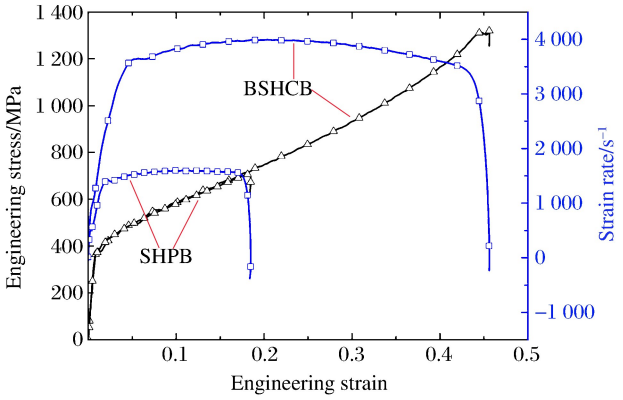


图 8 单向加载与双向加载结果对比

Fig. 8 Comparison between the results of traditional and bidirectional-load methods

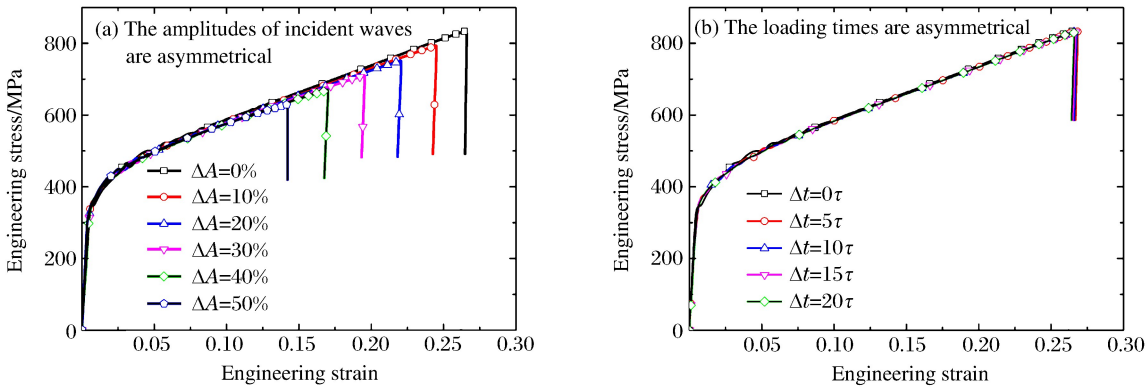


图 9 不对称加载时 2024 铝动态力学性能的计算结果

Fig. 9 Calculated results of 2024 aluminum alloy dynamic properties when the loadings are asymmetrical

实际实验中，绝对同步也是无法达到的，特别是霍普金森杆这种时间在微秒量级的实验。而两边入射波不同步的问题可以转化为两边波形不同的问题，即认为滞后的入射波在加载前有一段幅值为零。

令 $\tau=l_s/c_s$ 作为特征时间，其中，l_s 和 c_s 分别为试样的长度和试样材料弹性波速。通过数值模拟来比较2个加载波不同步时所得的工程应力-工程应变曲线。图9(b)所示为两边加载波时间差分别为0、5、10、15、20倍的特征时间时得到的工程应力-工程应变曲线的比较。从模拟结果看，2个加载波不同步对实验结果的准确性影响不大。在不同步情况下，在延迟的入射波到达试样之前，已经在该杆中存在一个从另一根杆中传递过来的应力波，因此，为了保证从压杆轴向中点处所测的入射波和反射波形不会叠加，2列入射波的时间差 Δt 应该满足 $(\Delta t+t_d)c_s<2l$，l 为应变片到压杆与试样接触面的距离。另外，入射波之间的延迟时间最大不能超过一个入射波长，否则会产生二次加载，从而导致实验结果不准确。

实际上，从理论上很容易理解上述分析结果。对于试样内部的应力均匀化过程，传统的SHPB加载方式和对称加载方式是2个极端情况，而不对称加载则是介于两者之间的一般情况，因此试样内部的应力均匀化时间也介于两者之间。

4.4　BSHCB 实验装置研制情况

传统的 SHPB 采用高速子弹撞击入射杆的方式产生应力波，这种方式很难同时产生 2 个对称的入射波。近年来，采用电磁能量装换技术实现应力波的产生[12-13]，不同于传统的加载方式，这种技术将 LC 电路储存的电磁能量直接转化成用于实验的应力波。应力波的特征依赖于 LC 电路的放电电流，因此能够保证应力脉冲产生时间和波形的精确控制。目前该技术已经取得了良好的效果，图 10 给出在实际实验中测到的 2 个入射杆中的应力波形，2 根入射杆完全相同，直径为 14 mm，长度为 3.5 m，中间未装试样，2 对应变片与应力波输入端的距离相同。从实验结果可以看出 2 个入射波幅值和时间误差很小。在实验中，2 个入射波之间的时间差约 2 μs，幅值误差在 5%以内，因此这一应力波发生技术可以应用于 BSHCB。另外，图 10 为单个 LC 电路放电所产生的应力波，是半正弦脉冲，通过多个 LC 电路的时序放电，可以产生不同形状的应力脉冲[14]，因此该技术在未来可以应用于单轴双向加载实验中 2 个入射波的产生。

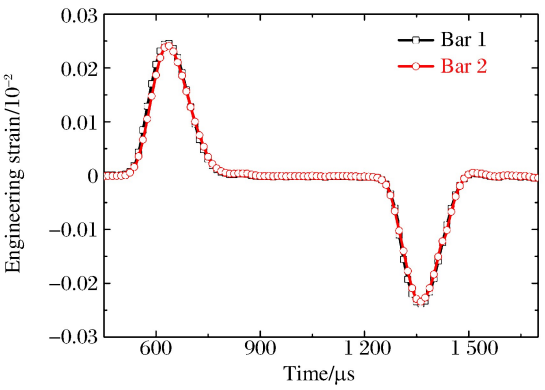


图 10　实际实验中测到的 2 个入射波形

Fig. 10　Two incident stress waves recorded in real experiment

5　结　论

提出了单轴双向加载分离式霍普金森杆(bidirectional-load split Hopkinson compression bar，BSHCB)，通过应力波理论推导出了单轴双向加载的数据处理公式，并用数值模拟的方法对公式的正确性进行了验证，得到以下结论：

(1)所推导的 BSHCB 的数据处理公式可以计算所测材料的工程应力、工程应变和工程应变率；

(2)单轴双向对称加载可缩短试样内部应力均匀化的过程，可以改善材料动态性能在弹性段测量的可靠性；

(3)同传统的 SHPB 技术相比，在相同条件下，BSHCB 所得到的试样应变率至少提高一倍，因此能够扩展材料动态力学实验所达到的应变率范围；

(4)所推导的 BSHCB 数值处理公式允许试样两端的加载条件存在不对称性，可以用于材料的变应变率测试或二次加载测试。

感谢周风华老师对本文提出的修改意见，感谢苗应刚博士对本文修改过程中的帮助。

参考文献：

[1] HOPKINSON B. A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1914,213(612):437-456. DOI: 10.1098/rspa.1914.0008.

[2] GARY G, MOHR D. Modified Kolsky formulas for an increased measurement duration of SHPB systems[J]. Experimental Mechanics, 2013,53(4):713-717. DOI: 10.1007/s11340-012-9664-7.

[3] NIE X, PRABHU R, CHEN WW, et al. A Kolsky torsion bar technique for characterization of dynamic shear response of soft materials[J]. Experimental Mechanics, 2011,51(9):1527-1534. DOI: 10.1007/s11340-011-9481-4.

[4] LIM J, CHEN W W, ZHENG J Q. Dynamic small strain measurements of Kevlar 129 single fibers with a miniaturized tension Kolsky bar[J]. Polymer Testing, 2010,29(6):701-705. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2010.05.012.

[5] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. Proceeding of the Physical Society, 1949,62(11):676-700. DOI: 10.1088/0370-1301/62/11/302.

[6] SONG B, GE Y, CHEN W W, et al. Radial inertia effects in Kolsky bar testing of extra-soft specimens[J]. Experimental Mechanics, 2007,47(5):659-670. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2010.05.012.

[7] PARRY D J, DIXON P R, HODSON S, et al. Stress equilibrium effects within Hopkinson bar specimens[J]. Journal De Physique IV, 1994,4(C8):107-112. DOI: 10.1051/jp4:1994816.

[8] WANG L L, LABIBES K, AZARI Z, et al. Generalization of split Hopkinson bar technique to use viscoelastic bars [J]. International Journal of Impact Engineering, 1994,15(5):669-686. DOI: 10.1016/0734-743X(94)90166-I.

[9] HOU B, ONO A, ABDENNADHER S, et al. IMPact behavior of honeycombs under combined shear-compression. Part I: Experiments[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011,48(5):687-697. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.11.005.

[10] 崔云霄,卢芳云,林玉亮,等.一种新的高应变率复合压剪实验技术[J]. 实验力学,2006,21(5):584-590. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2006.05.007.
CUI Yunxiao, LU Fangyun, LIN Yuliang, et al. A new combined compression-shear loading technique at high strain rates[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006,21(5):584-590. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2006.05.007.

[11] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1):31-48. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9.

[12] 李玉龙,聂海亮,汤忠斌,等.基于电磁力加载的分离式霍普金森压杆实验装置:CN201410161610.X[P]. 2014-07-09.

[13] 李玉龙,聂海亮,汤忠斌,等.一种基于电磁力的拉伸及压缩应力波发生器及实验方法:201410171963.8[P]. 2014-08-20.

[14] 李玉龙,聂海亮,汤忠斌,等.电磁式应力波发生器的主线圈及充电/放电的方法:201510051071.9[P]. 2015-06-03.

Data processing method for bidirectional-load split Hopkinson compression bar

NIE Hailiang, SHI Xiaopeng, CHEN Chunyang, LI Yulong

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

Abstract: This paper presents a bidirectional-load split Hopkinson compression bar (BSHCB), namely, adding other symmetrical incident wave on the basis of traditional split Hpkinson pressure bar (SHPB), the two incident waves would load the specimen synchronously and symmetrically. The data process equations are approached according to the one-dimensional stress wave theory. According to the numerical simulation analyses, it is concluded that the proposed data process equations can determine the engineering stress, engineering strain and engineering strain rate of the tested material in bidirectional-load split Hopkinson compression test. Moreover, compared with the traditional SHPB test, the specimens in bidirectional-load split Hopkinson compression test can reach constant stress state in shorter time, and the strain rate can be improved.

Keywords: bidirectional load; Hopkinson pressure bar; stress equilibrium; strain rate; data processing

(责任编辑 张凌云)