

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0210

直撞式霍普金森压杆二次加载技术*

钟东海, 郭鑫, 熊雪梅, 郑宇轩, 宋力

(宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 利用传统分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 实验技术来实现试件在较低应变率下的大变形时, 需要使用超长的压杆系统, 杆件的加工和实验空间限制了该技术的推广应用。鉴于此, 提出一种直撞式霍普金森压杆二次加载实验技术, 利用透射杆中的应力波在其末端的准刚性壁反射实现对试件的二次加载, 并分析了准刚性质量块尺寸对二次加载的影响规律; 采用二点波分离方法对叠加的应力波进行了有效分离和计算, 在总长 4 m 的压杆系统中实现了 1.2 ms 的长历时加载, 并可以准确获得试件的加载应变率曲线和应力应变关系。建立了直撞式霍普金森压杆二次加载有限元模型, 数值仿真结果表明, 该实验技术能有效地实现试件的二次加载, 与超长 SHPB 系统获得的仿真结果相比较, 两者的试件应力应变关系完全一致。利用该技术对 1100 铝合金材料进行动态压缩实验, 实现了其在 10^2 s^{-1} 量级应变率下的大变形动态力学性能测试。

关键词: SHPB; 二次加载; 波反演技术; 中应变率加载; 大变形

中图分类号: O347.4 **国标学科代码:** 13015 **文献标志码:** A

Direct-impact double-loading Hopkinson bar technique

ZHONG Donghai, GUO Xin, XIONG Xuemei, ZHENG Yuxuan, SONG Li

(Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education,
Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: When the conventional split Hopkinson pressure bar (SHPB) experimental method is used to realize large deformation of the specimen at a low strain rate, it is often necessary to employ an ultra-long compression bar system. However, the high cost of machining long bars and occupying large laboratory space limits the application and generalization of this technique. In this paper, a direct impact Hopkinson pressure bar double loading experimental technique is proposed. The stress wave in the transmission bar is reflected by the quasi-rigid wall at the end of the transmission bar to realize the double loading of the specimen. The influence of the size of the quasi-rigid mass on the double loading is further analyzed. The two-point wave separation method is used to separate and calculate the superimposed stress wave effectively, and the long duration loading of 1.2 ms is realized in the pressure bar system with a total length of 4 m, and the strain rate curve and stress-strain relationship of the specimen are obtained accurately. The finite element model of both direct-impact double loading and ultra-long Hopkinson bars are established. Numerical results indicate that this experimental technique can effectively achieve double loading of the specimen. Comparing the simulation results of direct-impact double loading Hopkinson bar with those of ultra-long Hopkinson bars, it is evident that the stress-strain relationships obtained by the two experimental devices are completely consistent. For direct-impact double loading Hopkinson bar, the stress-strain relationship calculated by the two-point wave separation technique is the same as that obtained by direct extraction method. Then, an experimental device of direct impact double-loading Hopkinson pressure bar has been set up, including a strike bar, a transmission bar and a rigid block. In addition,

* 收稿日期: 2022-05-16; 修回日期: 2022-10-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (12272193, 12072169, 11972203)

第一作者: 钟东海 (1997—), 男, 硕士研究生, zhongdonghai1997@foxmail.com

通信作者: 郑宇轩 (1986—), 男, 博士, 副教授, zhengyuxuan@nbu.edu.cn

the dynamic compression experiment of aluminum alloy was carried out using this device, and the large deformation dynamic mechanical properties of aluminum alloy were tested under the strain rate of 10^2 s^{-1} .

Keywords: SHPB; double-loading; wave inversion; intermediate strain rate loading; large deformation

分离式霍普金森杆实验技术广泛应用于材料的动态力学性能测试,经典 SHPB 系统的撞击杆一般长 200~800 mm,对于通常采用的钢杆或铝杆,其对应的加载时间约为 80~320 μs ,既难以实现材料在不太高的应变率下的高压缩应变,也难以实现一定应变下的中应变率加载。而延长有效加载时间,最直接的方法就是采用超长杆系统,简单地将撞击杆、入射杆和透射杆加长,即可获得更长的加载时间。Song 等^[1]采用撞击杆长为 2.5 m、总长 27.4 m 的超长 SHPB 系统,结合泡沫整形器,获得了 3 ms 以上的加载时长,但加载应力较低,只适用于软材料的动态力学性能测试。超长杆系统最大的优势就是沿用传统的测量技术和数据处理方法,简洁方便,但对于实验场地和杆件加工有较高的要求,推广较为困难。Zhao 等^[2]提出了采用液压装置取代撞击杆的“慢杆”霍普金森压杆装置,原则上可以实现从准静态到中高应变率材料的动态性能测试,但从已有的研究^[2-3]看,该技术仅限于软材料,且存在应变率不够稳定的问题,加上其结构相对复杂,因此应用较少。

直撞式霍普金森压杆(direct-impact Hopkinson bar, DHB)技术最早由 Dharan 等^[4]提出,后由 Wulf^[5]、Gorham 等^[6]、Shioiri 等^[7]予以改进,该技术的提出基于对高应变率(10^4 s^{-1} 量级)冲击压缩实验的需要,它解决了常规压杆的最大加载速度受限于压杆屈服强度的问题。DHB 也可用于实现试件在中高应变率下的大变形,如 Zhao 等^[8]、Liu 等^[9]、陈浩等^[10]给出了大变形直撞式压杆的一般设计方法。Gilat 等^[11]利用液压装置对试件直接加载,其稳定压缩加载时间约为 6 ms,但其透射杆长达 40 m。Whittington 等^[12]提出了一种折叠型压杆结构来增加压杆的有效长度,从而实现较长时的加载及测试,可视为超长杆的变型,该结构可以节省空间,但折叠联结更为困难,且易产生应力波反射干扰。利用入射杆中的反射波对试件多次加载是另一种实现材料大变形的办法,Lindholm^[13]最早使用该方法测试了铝合金,Xia 等^[14]结合 Lindholm 提出的方法实现了精准可控的多脉冲加载。巫绪涛等^[15]利用反射波再加载测试了泡沫铝,由于应力波过长,因此采用了两片法处理数据。虽然该方法能够延长加载时间,但是其多次加载之间出现了完全卸载,很难说是真正的延长了加载时间。

本文中提出一种直撞式二次加载霍普金森压杆(direct-impact double-loading Hopkinson bar, DDHB)实验技术,该技术仅需在直撞式压杆系统的透射杆末端加设一大质量钢块,利用其在实验中形成的近似刚性壁反射应力波来实现试件的二次加载。应力波的波形重叠问题则采用二点法^[16-17]波分离技术来解决,并通过数值模拟和实验验证该技术的可行性和准确性。

1 直撞式二次加载技术

1.1 实验原理

在透射杆末端设置一个大质量钢块,由一维应力波传播理论可知^[18],当应力波传播到杆-质量块界面时将形成应力波反射,由于钢块的广义波阻抗远大于压杆的广义波阻抗,可将质量块视为准刚性壁,因此反射波与入射波同号,幅值近似相同,即可形成对试件的二次加载。DDHB 系统如图 1 所示。

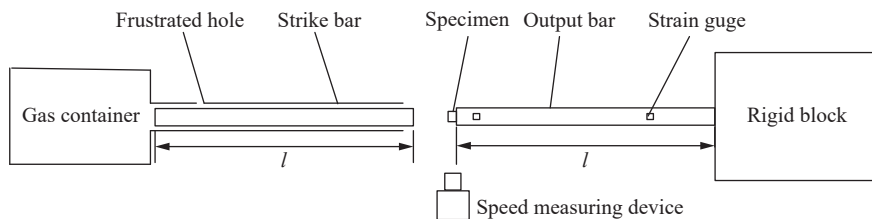


图 1 DDHB 系统

Fig. 1 DDHB system

假定试件为理想刚塑性材料, 屈服强度为 Y , 长度为 l_s , 截面积为 A_s ; 撞击杆与透射杆的长度均为 l , 弹性模量为 E , 截面积为 A_0 , 密度为 ρ , 弹性波速为 c , 撞击速度为 v_0 。由一维应力波理论可得撞击过程中的应力波传播轨迹($X-t$ 图)、质点速度和应力状态($\sigma-v$ 图), 如图 2 所示。

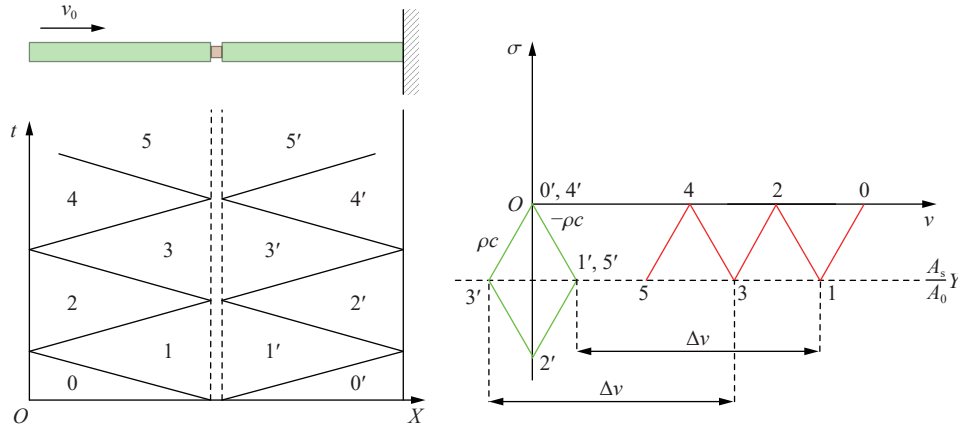


图 2 应力波传播的 $X-t$ 图和 $\sigma-v$ 图

Fig. 2 Stress wave propagation $X-t$ diagram and stress-velocity $\sigma-v$ diagram

撞击杆撞击试件时, 两者相互作用产生的压缩波对试件形成第一次加载。左行压缩波(区域 1)在撞击杆中传播到自由端后反射形成右行拉伸卸载波, 右行压缩波(区域 1')在透射杆中传播到刚性壁后反射形成左行压缩加载波, 右行拉伸卸载波与左行压缩加载波同时到达试件两端面, 形成第二次加载。第一次加载试件两端分别处于区域 1、1' 的状态, 而第二次加载试件两端分别处于区域 3、3' 的状态, 由图 2 中 $\sigma-v$ 图可知, 两次加载的速度差均为 Δv , 即两次加载的工程应变率相等:

$$\dot{\epsilon}_0 = \left(v_0 - 2 \frac{YA_s}{\rho c A_0} \right) / l_s \quad 0 \leq t < 4T \quad (1)$$

式中: $T = l/c$ 。直撞式二次加载可实现 $4l/c$ 的有效加载历时, 一个 1.5 m+1.5 m 的 DDHB 系统可实现 1.2 ms 的加载; 考虑一般实验室条件, 将撞击杆和透射杆加长至 6 m+6 m, 则 DDHB 系统可实现高达 4.8 ms 的加载。

如果试件为一般的弹塑性材料, 通过数值分析可知, 有效加载时间仍能达到 $4T$, 但加载应变率相对于刚塑性材料有一定的下降, 且在第二次加载起始处应变率小幅度突降, 如图 3 所示。造成该现象的主要原因是, 应力波在试件中传播需要一定的时间, 等长的撞击杆与透射杆会导致二次加载时两端应力波不能同时到达试件。同时, 从图中可以看出, 采用相同长度的杆件, SHPB 系统的加载时长为 T , DHB 系统的加载时长为 $2T$, 而 DDHB 系统的加载时长为 $4T$ 。

当撞击杆初速度较大 ($v_0 > 4YA_s/\rho c A_0$) 时, DDHB 系统还可以 $4T$ 为一个周期形成多次加载, 每个周期的加载应变率均下降 $\Delta \dot{\epsilon}$, 即:

$$\dot{\epsilon}_n = \dot{\epsilon}_0 - n\Delta \dot{\epsilon} = \left(v_0 - (2 + 4n) \frac{YA_s}{\rho c A_0} \right) / l_s \quad (2)$$

式中: $n = [t/(4T)]$, $\Delta \dot{\epsilon} = 4YA_s/(\rho c A_0 l_s)$ 。若针对软材料(Y 较小)、小尺寸试件(A_s 较小), 提高撞击杆速度(v_0 较大), 使得 $\Delta \dot{\epsilon} \ll \dot{\epsilon}_0$, 可近似实现对试件的多次有效加载, 加载时间可高达 $4nT$ 。需要说明的是, 对于应变硬化显著的弹塑性材料, 直

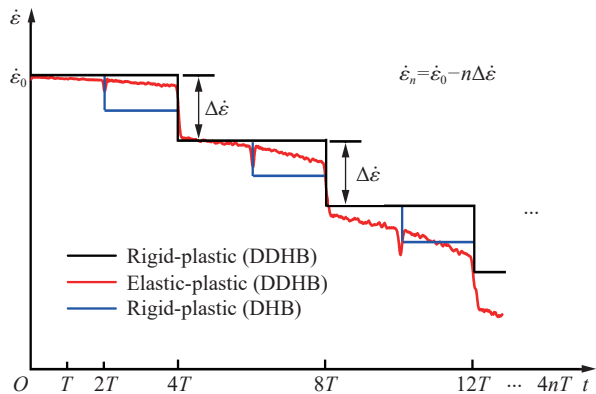


图 3 不同条件下的应变率时程曲线

Fig. 3 Strain rate time history curves under different conditions

撞式霍普金森压杆技术由于无法采用整形器整形, 从而较难实现恒应变率加载, 因此材料在加载过程中的应变率下降较显著, 通过式(1)可以简单估算工程应变率的下降量。

1.2 波反演技术

由于采用了等长的撞击杆和透射杆来提高加载时间, 应力波将会在杆件中出现重叠。因此采用两点法波分离技术^[16-17]分离杆中叠加的左行和右行应力波, 应力波分离技术参见文献^[19]。如图 4 所示, 以撞击端为原点, 并以撞击时刻为时间原点, 当杆的左端受到撞击时产生右行波。当 $t \leq t_A$ 时, 点 A 处应变片所记录的信号 $\varepsilon_A(t)$ 就是点 A 处的右行波 $\varepsilon_{r,A}(t)$, 其中 $t_A = (2L - l_A)/c$, l_A 为点 A 到原点的距离, L 为杆的长度; 当 $t > t_A$ 时, $\varepsilon_A(t)$ 是 t 时刻点 A 处的右行波 $\varepsilon_{r,A}(t)$ 与反射回来的左行波 $\varepsilon_{l,A}(t)$ 的叠加, 即:

$$\varepsilon_A(t) = \varepsilon_{r,A}(t) + \varepsilon_{l,A}(t) \quad (3)$$

由于杆中的弹性波均为简单波, 因此点 A 处的左行波 $\varepsilon_{l,A}(t)$ 与点 B 处的左行波 $\varepsilon_{l,B}(t)$ 传播 Δt 后的波形一致, 即:

$$\varepsilon_{l,A}(t) = \varepsilon_{l,B}(t - \Delta t) \quad (4)$$

式中: $\Delta t = (l_B - l_A)/c$, l_B 为点 B 到原点的距离。由叠加关系可知, 点 B 处应变片所记录的信号 $\varepsilon_B(t - \Delta t) = \varepsilon_{l,B}(t - \Delta t) + \varepsilon_{r,B}(t - \Delta t)$, 而点 B 的右行波 $\varepsilon_{r,B}(t)$ 与点 A 的右行波 $\varepsilon_{r,A}(t)$ 之间的关系为: $\varepsilon_{r,B}(t) = \varepsilon_{r,A}(t - \Delta t)$ 。点 A 的右行波 $\varepsilon_{r,A}(t)$ ^[9] 为:

$$\varepsilon_{r,A}(t) = \begin{cases} \varepsilon_A(t) & t < t_A \\ \varepsilon_A(t) - \varepsilon_B(t - \Delta t) + \varepsilon_{r,A}(t - 2\Delta t) & t \geq t_A \end{cases} \quad (5)$$

同理, 点 B 的左行波 $\varepsilon_{l,B}(t)$ 为:

$$\varepsilon_{l,B}(t) = \begin{cases} 0 & t < t_B \\ \varepsilon_B(t) - \varepsilon_A(t - \Delta t) + \varepsilon_{l,B}(t - 2\Delta t) & t \geq t_B \end{cases} \quad (6)$$

式中: $t_B = (2L - l_B)/c$ 。值得注意的是, 当 $t \leq t_B$ 时, 左行波未到达点 B, 因此 $\varepsilon_{l,B}(t) = 0$ 。

1.3 质量块尺寸对二次加载的影响

应力波在相同材质的变截面杆中将发生透反射, 其反射系数^[18]为:

$$F = \frac{1 - n}{1 + n} \quad (7)$$

式中: $n = (\rho_0 c_0 A)_1 / (\rho_0 c_0 A)_2$, $\rho_0 c_0 A$ 为广义波阻抗, 下标 1 和 2 表示变截面的前后截面。当杆的直径为 16 mm 时, 可计算得到反射系数为 98% 时质量块的直径 D 为 160 mm。为了弄清楚质量块长度对反射的影响, 建立有限元模型, 分析质量块长度分别为其直径的 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0 倍时的反射系数。如图 5 所示, 当质量块长度大于 240 mm 时, 继续增加杆长对反射系数的影响不明显, 因此选取直径为杆径 10 倍、长度为杆径 20 倍的质量块即可较好地实现准固壁反射。

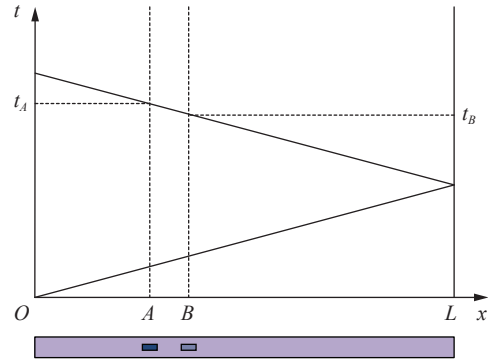


图 4 波分离示意图

Fig. 4 Schematic diagram of stress wave separation

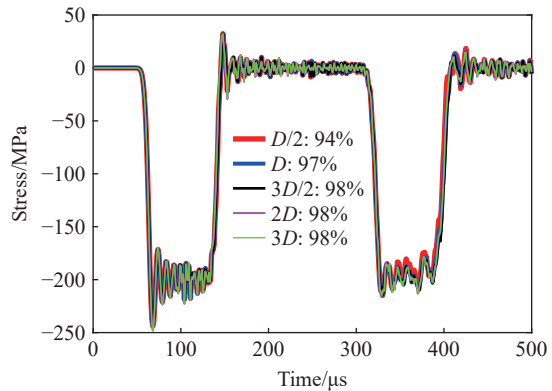


图 5 质量块的反射系数

Fig. 5 Reflection coefficient of rigid mass block

1.4 试件受力及变形计算

为了计算试件的应力与应变,必须获得透射杆左端面的应变信号 $\varepsilon_0(t)$ 以及质点速度 v_2 , 而 $\varepsilon_0(t)$ 是左端面的右行波 $\varepsilon_{r,0}(t)$ 与左行波 $\varepsilon_{l,0}(t)$ 的简单叠加, 其中 $\varepsilon_{r,0}(t)$ 与 $\varepsilon_{r,A}(t)$ 传播 l_A/c 前的波形一致, $\varepsilon_{l,0}(t)$ 与 $\varepsilon_{l,B}(t)$ 传播 l_B/c 后的波形一致, 即:

$$\varepsilon_0(t) = \varepsilon_{r,A} \left(t + \frac{l_A}{c} \right) + \varepsilon_{l,B} \left(t - \frac{l_B}{c} \right) \quad (8)$$

而透射杆左端面的质点速度 v_2 可由下式^[2] 确定:

$$v_2 = c \left(\varepsilon_{r,A} \left(t + \frac{l_A}{c} \right) - \varepsilon_{l,B} \left(t - \frac{l_B}{c} \right) \right) \quad (9)$$

沿用经典霍普金森杆应力平衡假定, 结合初始碰撞速度 v_0 和透射杆信号, 能够获得撞击杆端面质点速度。当 $2NT \leq t \leq 2(N+1)T$, 试件左端面的质点速度可由下式^[8] 确定:

$$v_1 = v_0 - \frac{1}{\rho c A_0} \left(F(t) + \sum_{i=1}^N 2F(t - 2iT) \right) \quad (10)$$

式中: $F(t) = \varepsilon_0(t)EA_0$, $N=[t/(2T)]$, $[a]$ 代表对数 a 取整。

从而可获得试件的应力、应变以及应变率的表达式:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_1 - v_2}{l_s}, \quad \varepsilon = \int \dot{\varepsilon} dt, \quad \sigma = \frac{F(t)}{A_s} \quad (11)$$

2 数值模拟

采用 Abaqus/Explicit 有限元软件建立 DDHB 以及超长 SHPB 模型。DDHB 系统中透射杆长度为 1 500 mm, 质量块为 $\varnothing 186 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的圆柱钢块; 超长 SHPB 系统中撞击杆长度为 3 028 mm, 入射杆长度为 7 000 mm, 透射杆长度为 4 000 mm。杆件均采用 $\varnothing 16 \text{ mm}$ 的高强钢, 杨氏模量 $E=206 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu=0.295$, 密度 $\rho=7\,800 \text{ kg/m}^3$ 。试件选用无氧铜材料, 尺寸为 $\varnothing 6 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的圆柱体, 采用 Johnson-Cook 本构模型描述其弹塑性力学行为, 材料参数取自文献 [20]。杆和质量块的网格尺寸为 1 mm, 单元总量分别为 12 000 和 46 500, 试件的网格尺寸为 0.5 mm, 单元总量为 96, 所有的网格类型均为 CAX4R。

当试件为弹塑性材料时, 第二次加载起始处应变率有大幅度下降, 因此需要适当延长撞击杆来使应力波同时达到试件两端。固定 DDHB 透射杆长度为 1 500 mm, 通过改变撞击杆长度, 分析二次加载中的应变率突降, 如图 6 所示。当撞击杆与透射杆等长时, 应变率在第二次加载起始阶段具有明显的下降, 而当撞击杆过长 (如 1 530 mm) 时, 又有明显的上升。而当撞击杆为 1 514~1 520 mm 时, 二次加载的连贯性较好, 下降或者上升均不明显, 如图 6(a) 所示。撞击杆和透射杆长度的精准匹配依赖于被测材料的长度和波速, 基本原则是撞击杆略长于透射杆即可, 但即使撞击杆和透射杆的长度略微有些不匹配, 对于应变率不是特别敏感的材料, 对材料力学性能的测试结果也几乎没有影响, 如图 6(b) 所示。

对比分析 DDHB 系统与超长 SHPB 系统加载性能。当撞击杆长为 1 514 mm、初始速度为 6 m/s 时, DDHB 系统与超长 SHPB 系统的加载应变率历史基本一致, 试件中的平均应力-应变曲线也完全相同, 如图 7 所示。计算结果表明, DDHB 系统完全可以实现与超长 SHPB 系统相同的加载时长, 只是在二次加载时, 由于大质量块尚不能完全等效为固壁端, 加载应变率略低于超长 SHPB 系统, 如图 7(a) 所示; 但其应力-应变曲线的差异完全可以忽略, 如图 7(b) 所示。

提取无氧铜模型 DDHB 系统中透射杆上距离撞击端 50、1 150 mm 位置处的轴向应变信号, 等效实验中应变片的采集情况, 通过波反演技术和数据处理可到试件的加载应变率时程曲线和应力-应变关系, 如图 8 所示。通过杆上两点应变信号获得的结果与试件直接提取的结果基本一致, 但二次加载初期时, 通过应变数据处理获得的应变率出现小幅回落现象, 如图 8(a) 所示, 该现象主要与波形几何弥散有关。

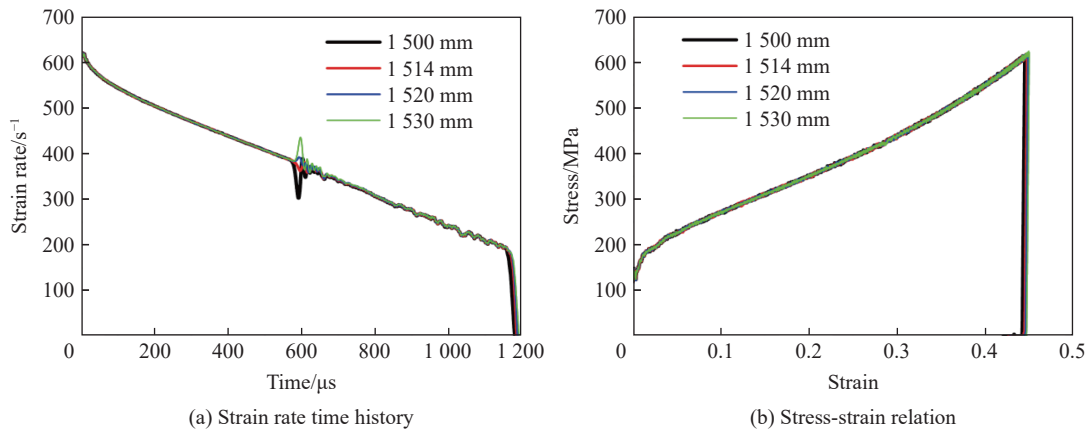


图 6 不同撞击杆长度对加载的影响

Fig. 6 Influence of different strike bar length on loading process

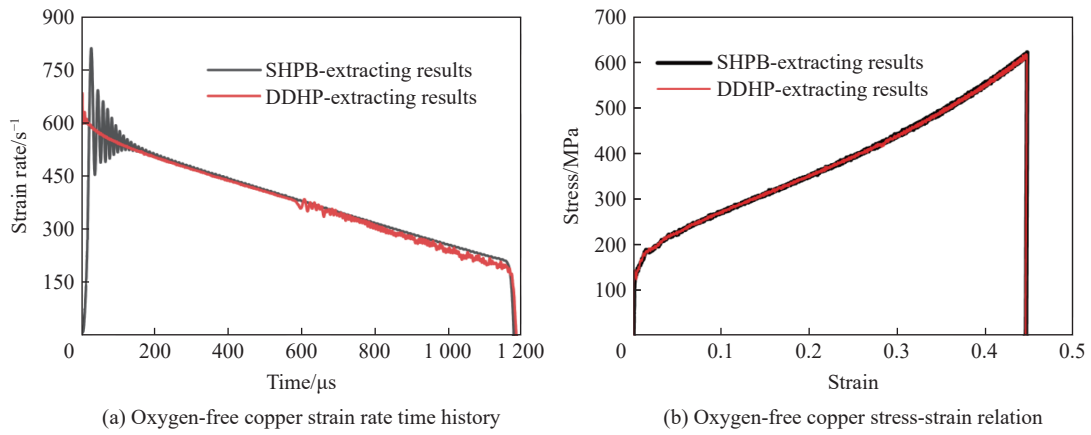


图 7 DDHB 和 SHPB 仿真结果

Fig. 7 DDHB and SHPB simulation results

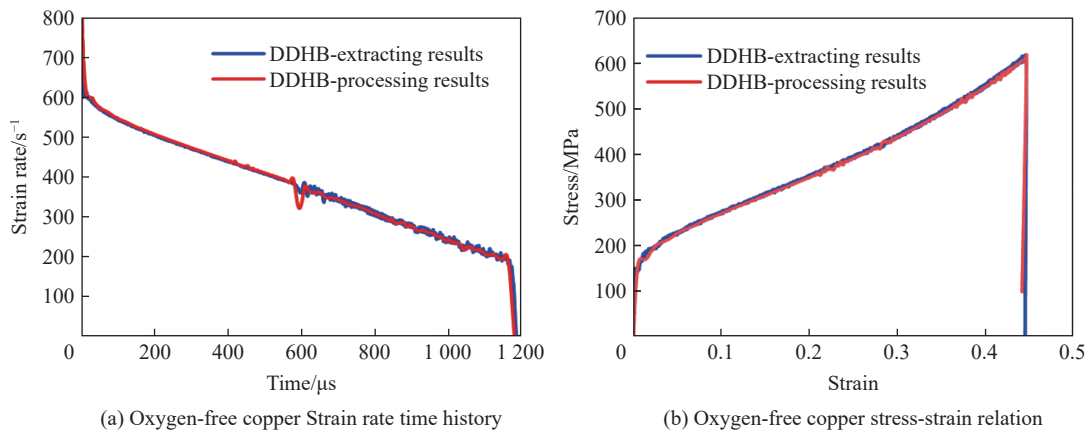


图 8 数据处理结果与直接处理结果

Fig. 8 Data processing and direct extraction results

3 实验验证

如图 9 所示, 实验采用 $\varnothing 16$ mm 的 DDHB 系统, 撞击杆长度为 1 500 mm, 透射杆长度略小于撞击杆,

等效固定端的质量块为 165 mm×200 mm×425 mm 的方形钢块。杆件和质量块的材料均为高强度钢, 杨氏模量 $E=206 \text{ GPa}$ 、泊松比 $\mu=0.295$ 、密度 $\rho=7\,800 \text{ kg/m}^3$, 试件为 $\varnothing 6.0 \text{ mm} \times 8.2 \text{ mm}$ 的铝合金。

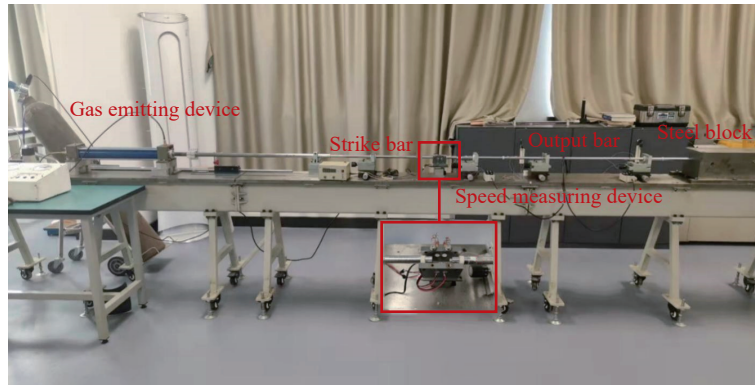


图 9 实验装置图

Fig. 9 Diagram of experimental device

测速装置紧靠试件, 以获得尽可能准确的撞击速度。图 10(a) 为撞击杆速度为 5.81 m/s 时透射杆的两个(位置 A、B)应变片上测得的波形; 利用式 (5)~(6) 可分离得到位置 A 上的右行波和位置 B 上的左行波(位置 A 更靠近撞击端), 如图 10(b) 所示; 结合式 (8)~(10) 可获得试件两端面的速度以及试件受到的载荷, 如图 10(c)~(d) 所示。

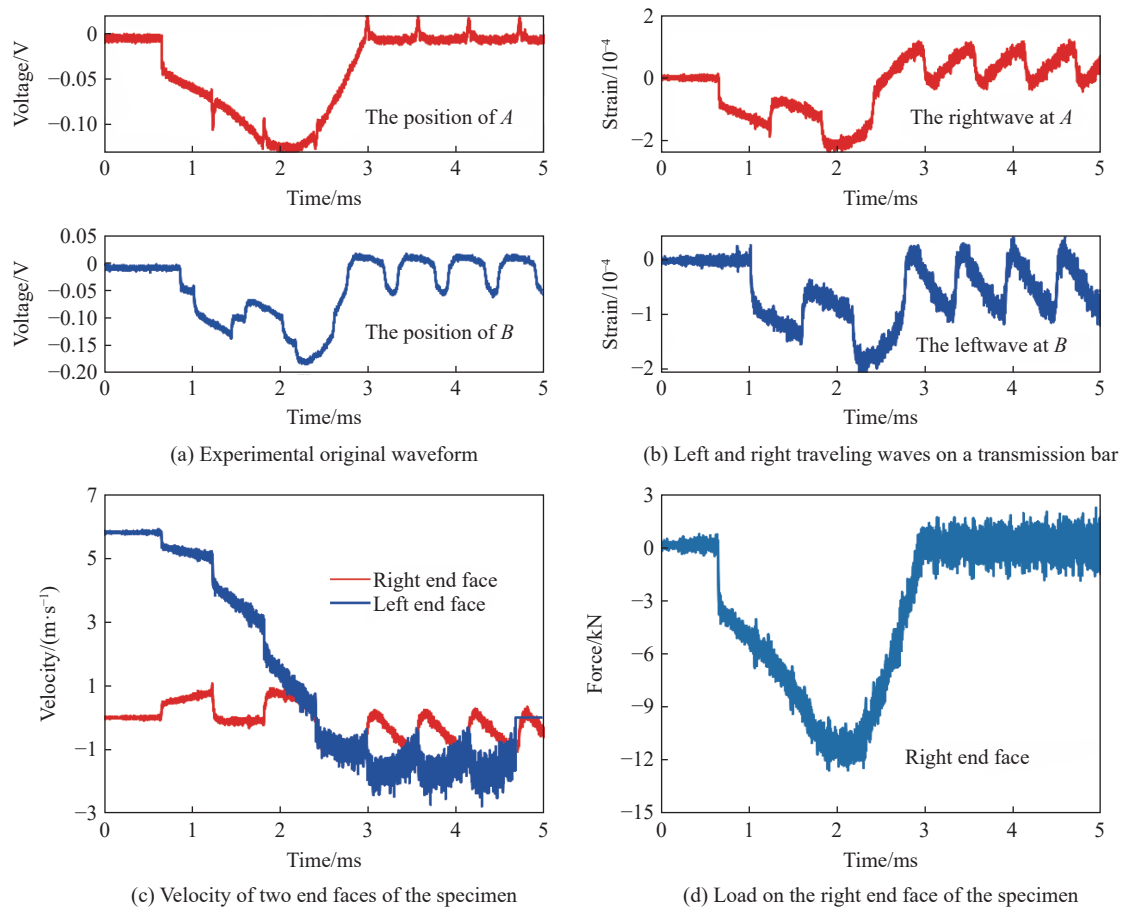


图 10 速度为 5.81 m/s 时的原始波形、分离的左右行波以及试件端面的速度和力

Fig. 10 The original waveform, the separated left and right traveling waves, and the velocity and force at the end face of the specimen with a velocity of 5.81 m/s

利用式(11)即可得到相应的应力-应变曲线和应变率曲线,实验结果采取了 100 kHz 的低通滤波进行光滑。如图 11 所示,当撞击杆速度为 5.81 m/s 时,铝合金试件的平均应变率约为 500 s^{-1} ,试件的最大压缩应变约为 60%;当撞击杆速度为 1.62 m/s 时,铝合金的平均应变率约为 80 s^{-1} ,试件的最大压缩应变将近 10%。诚然,在二次加载初期,应变率的连贯性尚有不足,但是对于材料在一定应变率加载范围内的应力-应变关系的获得没有显著影响。

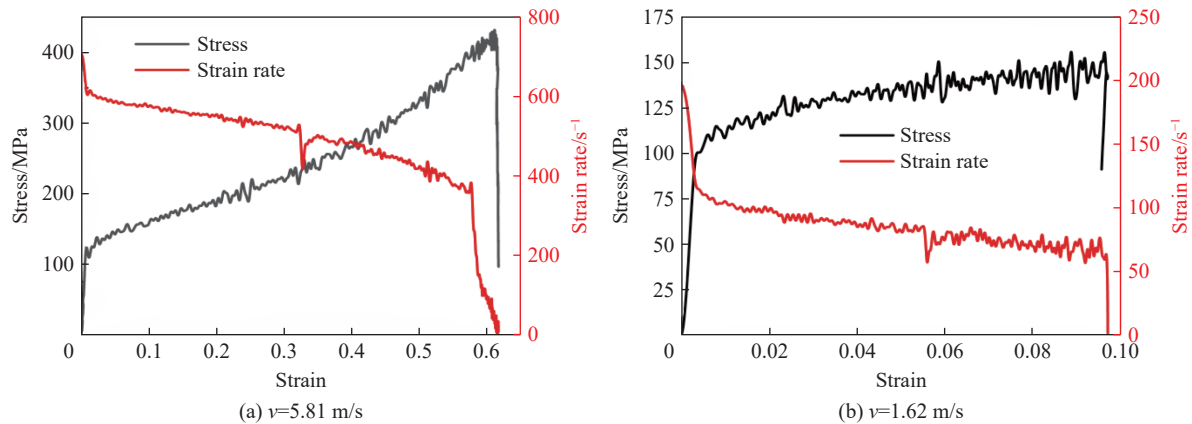


图 11 DDHB 测试铝合金的实验结果

Fig. 11 Experimental results of testing aluminum alloy by DDHB

4 结 论

提出了一种直撞式二次加载霍普金森压杆实验技术,采用略长于透射杆的撞击杆,通过准刚性壁应力波反射实现二次加载,从而在一个整体长度仅 4 m 的压杆系统中产生了 1.2 ms 的加载时长,并且 DDHB 系统对测试材料的强度没有限制。

数值模拟结果表明,DDHB 系统能有效地实现试件的二次加载,与超长 SHPB 压杆系统获得的数值结果一致;通过波分离技术计算得到的试件应力-应变关系与试件内部直接提取结果也相同;DDHB 系统中撞击杆略长于透射杆,能有效降低二次加载初期的应变率不连贯性。利用 DDHB 实验技术对铝合金进行动态加载,在应变率约 80 s^{-1} 加载下最大压缩应变达到了 10%,而在应变率约 500 s^{-1} 加载下最大压缩应变达到了 60%。

参考文献:

- [1] SONG B, SYN C J, GRUPIDO C L, et al. A long split Hopkinson pressure bar (LSHPB) for intermediate-rate characterization of soft materials [J]. *Experimental Mechanics*, 2008, 48(6): 809–815. DOI: 10.1007/s11340-007-9095-z.
- [2] ZHAO H, GARY G. A new method for the separation of waves. Application to the SHPB technique for an unlimited duration of measurement [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1997, 45(7): 1185–1202. DOI: 10.1016/S0022-5096(96)00117-2.
- [3] SHIM J, MOHR D. Using split Hopkinson pressure bars to perform large strain compression tests on polyurea at low, Intermediate and High Strain Rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(9): 1116–1127. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.12.010.
- [4] DHARAN C K H, HAUSER F E. Determination of stress-strain characteristics at very high strain rates [J]. *Experimental Mechanics*, 1970, 10(9): 370–376. DOI: 10.1007/BF02320419.
- [5] WULF G L. The high strain rate compression of 7039 aluminium [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1978, 20(9): 609–615. DOI: 10.1016/0020-7403(78)90019-X.
- [6] GORHAM D A, POPE P H, FIELD J E. An improved method for compressive stress-strain measurements at very high strain rates [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1992, 438(1902): 153–170.

- DOI: 10.1098/rspa.1992.0099.
- [7] SHIOIRI J, SAKINO K, SANTOH S. Strain rate sensitivity of flow stress at very high rates of strain [M]//KAWATA K, SHIOIRI J. *Constitutive Relation in High/Very High Strain Rates*. Tokyo: Springer, 1996. DOI: 10.1007/978-4-431-65947-1_6.
- [8] ZHAO H, ELNASRI I, ABDENNADHER S. An experimental study on the behaviour under impact loading of metallic cellular materials [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2005, 47(4/5): 757–774. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2004.12.012.
- [9] LIU J G, HE S Y, ZHAO H, et al. Experimental investigation on the dynamic behaviour of metal foam: from yield to densification [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 114: 69–77. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.12.016.
- [10] 陈浩, 郭鑫, 宋力. 直接撞击式大变形霍普金森压杆实验技术 [J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2018, 31(4): 70–73. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5132.2018.04.012.
- CHEN H, GUO X, SONG L. A direct impact Hopkinson pressure bar technique for material testing in large deformation [J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2018, 31(4): 70–73. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5132.2018.04.012.
- [11] GILAT A, SEIDT J D, MATRKA T A, et al. A new device for tensile and compressive testing at intermediate strain rates [J]. *Experimental Mechanics*, 2019, 59(5): 725–731. DOI: 10.1007/s11340-019-00488-1.
- [12] WHITTINGTON W R, OPPEL A L, FRANCIS D K, et al. A novel intermediate strain rate testing device: The serpentine transmitted bar [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 81: 1–7. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.02.009.
- [13] LINDHOLM U S. Some experiments with the split Hopkinson pressure bar [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1964, 12(5): 317–335. DOI: 10.1016/0022-5096(64)90028-6.
- [14] XIA K, CHEN R, HUANG S, et al. Controlled multipulse loading with a stuffed striker in classical split Hopkinson pressure bar testing [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(5): 053906. DOI: 10.1063/1.2928810.
- [15] 巫绪涛, 胡时胜, 张芳荣. 两点应变测量法在 SHPB 测量技术上的运用 [J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(4): 309–312.
- WU X T, HU S S, ZHANG F R. Application of two-point strain measurement to the SHPB technique [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(4): 309–312.
- [16] LUNDBERG B, HENCHOZ A. Analysis of elastic waves from two-point strain measurement [J]. *Experimental Mechanics*, 1977, 17(6): 213–218. DOI: 10.1007/BF02324491.
- [17] YANAGIHARA N. The new measuring method of impact force [J]. *Bulletin of JSME*, 1978, 21(157): 1085–1088. DOI: 10.1299/jsme1958.21.1085.
- [18] 王礼立. 应力波基础 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005: 47–50.
- WANG L L. *Foundation of stress waves* [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 47–50.
- [19] OTHMAN R. Wave separation techniques [M]//OTHMAN R. *The Kolsky-Hopkinson Bar Machine: Selected Topics*. Cham: Springer, 2018: 183–203. DOI: 10.1007/978-3-319-71919-1_7.
- [20] 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.

(责任编辑 曾月蓉)