

# 直接撞击式大变形霍普金森压杆实验技术

陈浩, 郭鑫, 宋力\*

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 作为高应变率材料力学性能测试的主要手段, 霍普金森压杆实验的测试时长受到压杆长度限制, 试件无法在较宽广的应变率下实现大变形. 由此提出了一种在有限杆长下实现大变形加载的实验技术, 该技术将传统上用于超高应变率实验的直接撞击方法应用于较低应变率下的材料动态性能测试, 可实现  $10^2 \text{ s}^{-1}$  量级应变率下材料较大变形下的动态应力—应变曲线测试. 实际应用表明该方法简单有效. 并且文中也对该技术的适用范围、实验装置的几何参数及材料参数对测试结果的影响进行了分析讨论.

**关键词:** 直接撞击; 霍普金森压杆; 大变形

中图分类号: O347.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 04-0070-04

在动态加载条件下, 工程材料的力学特性通常采用应变率相关的本构方程来描述, 材料动态力学特性的差异则通过其本构参数来体现. 由于材料的相关本构参数无法用理论分析方式得到, 而必须通过材料动态加载实验来确定. 分离式霍普金森压杆(SHPB)或 Kolsky 杆是现今使用最为广泛, 并被认为是可有效地应用于测试材料高应变率下力学特性的实验装置<sup>[1]</sup>, 常用来测试各种工程材料在  $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$  应变率范围内的动态应力—应变曲线<sup>[2-3]</sup>. 与其他测试技术相比, 霍普金森压杆实验具有加载平稳可控、测试精度高、装置耐用可靠等优势. 然而经典的霍普金森压杆也存在某些不足, 其测试时长受到压杆系统的总长限制, 而且经典数据处理方法要求在测试上满足杆中左行、右行波的明确分离, 因此对于长度为  $L$  的撞击杆, 通常要求入射杆长度  $L_i$  大于  $2L$ , 透射杆长度  $L_t$  等于或略小于入射杆, 而加载持续时间小于  $2L/C_0$  ( $C_0$  为杆中一维应力波速). 这样, 在装置总长度有限的情况下, 霍普金森压杆实际上只能在较高应变率下实现较大的实验应变, 而在  $10^2 \text{ s}^{-1}$  量级的应变率下不能或很难实现满足需要的试件变形.

为使试件在测试中达到足够大的应变, 最直接方法是采用超长 SHPB 实验系统, 其优点是可以采用通常的霍普金森压杆实验方式、脉冲整形技术及数据处理方法. 不过超长实验系统的空间要求、系统加工难度及成本都远高于常见的 SHPB 装置, 因此其虽有应用, 但仍较为少见. “慢杆”技术则是另一种可实现大变形实验的方案, 由 Zhao 等<sup>[4]</sup>提出, 它由液压加载系统、压杆系统及相应的应力波反演数据处理软件组成, 但其结构较复杂, 也较少使用. 出于应用的需要, 我们提出一种基于传统霍普金森压杆系统的直接撞击式大变形实验技术, 可以在现有测试装置上很好地实现大变形冲击实验, 能够在  $10^2 \text{ s}^{-1}$  量级应变率下测得材料的动态应力—应变曲线.

## 1 直接撞击式霍普金森杆压杆技术

最早由 Dharan 等<sup>[5]</sup>提出直接撞击式霍普金森杆压杆技术, 后由 Gorham 等<sup>[6]</sup>予以改进, 该技术是出于对高应变率( $10^4 \text{ s}^{-1}$  量级)冲击压缩实验需要而提出的. 实际上, 该技术也可方便地用于  $10^2 \text{ s}^{-1}$  量级应变率下的常规测试, 或  $10^3 \text{ s}^{-1}$  量级应变率下的

收稿日期: 2017-11-14.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11272162); 浙江省教育厅科研项目(Y200907622); 宁波大学科技学院预研项目(003-21021003).

第一作者: 陈浩(1993-), 男, 河南新乡人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: 962004360@qq.com

\*通信作者: 宋力(1961-), 男, 江西萍乡人, 副教授, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: songli@nbu.edu.cn

大变形测试上.

对于图1所示的实验方式, 在引入应力均匀性假设及适当简化的前提下, 试件的应变率 $\dot{\varepsilon}_s$ 、应变 $\varepsilon_s$ 、应力 $\sigma_s$ 可由下式计算:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{1}{L_s} [V_B - \int_0^t \frac{A_0 E_0 \varepsilon_t^*(\tau)}{M_B} d\tau - C_0 \varepsilon_t^*(t)], \\ \varepsilon_s(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_s(\tau) d\tau, \\ \sigma_s(t) = \frac{A_0}{A_s} E_0 \varepsilon_t^*(t), \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $M_B$  及  $V_B$  分别为撞击杆的质量及初速度;  $E_0$  为压杆材料的弹性模量;  $C_0$  为杆中一维应力波波速;  $\varepsilon_t^*(t)$  是仅由于试件作用所引起的透射杆中的右行应力波, 在测试时间较长时, 需要通过应力波反演来确定.

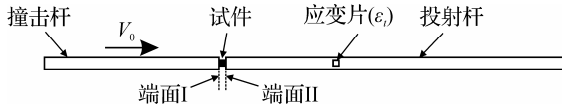


图1 直接撞击式霍普金森压杆

在利用直撞式方案进行测试时, 可以采用应力波分离技术来实现长时实验<sup>[7]</sup>. 设透射杆长度为 $L_0$ , 其上记应变片距接触试件一端的距离为 $a$ , 应变片测得信号为 $\varepsilon_m(t)$ , 压杆横截面积为 $A_0$ .

记 $t_a = 2a / C_0$ ,  $t_b = 2(L_0 - a) / C_0$ ,

对于图1的测试系统可写为:

$$\varepsilon_1^*(t) = \varepsilon_m(t), 0 \leq t \leq t_b, \quad (2)$$

$$\varepsilon_2^*(t) = \varepsilon_m(t) - \varepsilon_1^*(t - t_b), t_b < t \leq t_b + t_a, \quad (3)$$

$$\varepsilon_3^*(t) = \varepsilon_m(t) - \varepsilon_2^*(t - t_b) + \varepsilon_2^*(t - (t_b + t_a)), \quad (4)$$

$$\varepsilon_4^*(t) = \varepsilon_m(t) - \varepsilon_3^*(t - t_b) - \varepsilon_3^*(t - (2t_b + t_a)) + \varepsilon_3^*(t - (t_b + t_a)), 2t_b + t_a < t \leq 2t_b + 2t_a, \quad (5)$$

$$\varepsilon_n^*(t) = \varepsilon_m(t) + \sum_{k=1}^n (-1)^k \varepsilon_{n-1}^*(t - t_k), \quad (6)$$

$$t_{L,n} \leq t \leq t_{R,n},$$

其中:

$$t_k = \begin{cases} l(t_b + t_a) + t_b, k = 2l + 1, l = 0, 1, 2, \dots, \\ l(t_b + t_a), k = 2l, l = 1, 2, \dots, \end{cases}$$

$$t_{L,n} = \begin{cases} l(t_b + t_a), n = 2l + 1, l = 0, 1, 2, \dots, \\ (l-1)(t_b + t_a) + t_b, n = 2l, l = 1, 2, \dots, \end{cases}$$

$$t_{R,n} = \begin{cases} (l-1)(t_b + t_a) + t_b, n = 2l + 1, l = 1, 2, \dots, \\ l(t_b + t_a), n = 2l, l = 1, 2, \dots, \end{cases}$$

最后可得:

$$\varepsilon_t^*(t) = \begin{cases} \varepsilon_m(t), 0 \leq t \leq t_b, \\ \varepsilon_n^*(t), t > t_b. \end{cases} \quad (7)$$

## 2 大变形实验实际测试效果

采用上述直撞击杆分别对一种铜合金材料及一种有色金属多孔材料进行了测试, 试件统一尺寸为 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ , 实验中使用 $\Phi 37$  钢质压杆, 透射杆杆长 $2 \text{ m}$ , 撞击杆杆长 $0.8 \text{ m}$ .

图2~图3即为2种材料的测试结果. 从图中可见, 对于测试的实体铜合金试件, 最大工程应变可以达到 $0.6$ 左右, 而多孔金属材料实验最大工程应变可达 $0.9$ , 并且同时实验中应变率下降程度在可接受范围, 而上述结果在传统霍普金森压杆系统上(超长压杆系统除外)是难以实现的.

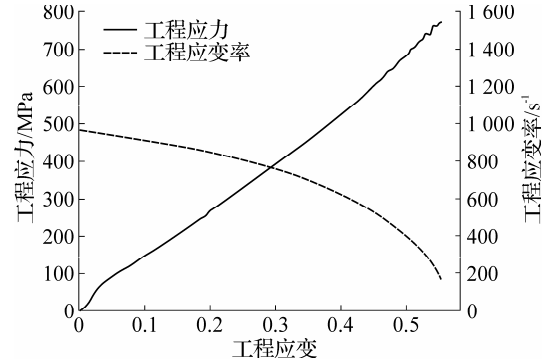


图2 铜合金材料测试结果

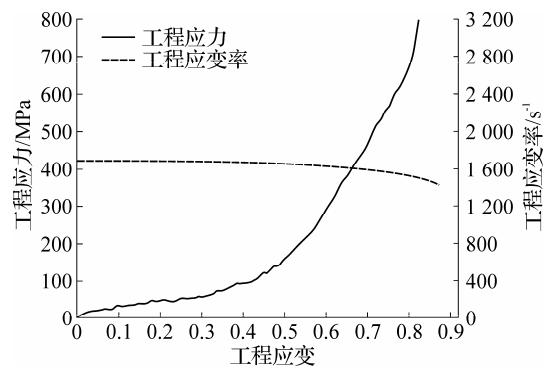


图3 多孔金属材料测试结果

## 3 直撞式恒应变率实验限制条件

此外, 从图2和图3还可以看到, 直撞式压杆的实验应变率总随着时间的增加呈下降趋势. 实际上对于特定装置, 其在实验过程中的应变率总是有所变化的, 这种变化与试件、压杆系统有关.

而有效的霍普金森杆压杆实验需要实验中试件的应变率具有某种程度的恒定性,为此引入应变率下降率  $\alpha = (\dot{\varepsilon}_0 - \dot{\varepsilon}_{\text{end}}) / \dot{\varepsilon}_0$ , 其中,  $\dot{\varepsilon}_0$  为实验的初始工程应变率,  $\dot{\varepsilon}_{\text{end}}$  为实验中止时的应变率. 对于直接撞击霍普金森压杆系统, 可以采用限定  $\alpha$  的方式来提出应变率恒定性要求.

从满足工程需要角度出发, 可从平均意义上讨论实验中应变率的下降问题, 此时可将撞击杆与透射杆近似视为刚体. 记被测材料的平均屈服应力为  $Y_s$ , 横截面面积为  $A_s$ , 试件高度为  $H$ , 撞击杆质量为  $M_B$ , 透射杆质量为  $M_t$ , 设试件左右端面的运动速度分别为  $v_I$  和  $v_{II}$ , 参考图 1 可写出:

$$v_I - v_{II} = v_0 - \left( \frac{Y_s A_s}{M_B} + \frac{Y_s A_s}{M_t} \right) t, \quad (8)$$

$$\frac{v_I - v_{II}}{H} = \frac{v_0}{H} - \frac{YA}{H} \left( \frac{1}{M_B} + \frac{1}{M_t} \right) t,$$

上式中实验初始工程应变率为  $\dot{\varepsilon}_0 = v_0 / H$ , 实验中止时的应变率为  $(1 - \alpha)\dot{\varepsilon}_0$ .

近似取测试过程中试件平均应变率为:

$$\bar{\dot{\varepsilon}} \approx \frac{\dot{\varepsilon}_0 + (1 - \alpha)\dot{\varepsilon}_0}{2} = \frac{2 - \alpha}{2} \dot{\varepsilon}_0.$$

此时需注意到实验中止时 ( $t = t_{\text{end}}$ ) 试件最大应变  $\varepsilon_{\text{max}} = \bar{\dot{\varepsilon}} t_{\text{end}}$ , 利用式(8)对特定  $\alpha$  可给出条件:

$$\frac{YA}{H} \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) \frac{\varepsilon_{\text{max}}}{\bar{\dot{\varepsilon}}^2} \leq \frac{2\alpha}{2 - \alpha}. \quad (9)$$

式(9)可作为实验设计的依据, 即在给定实验应变率下降及最大实验应变要求的情况下, 公式应得到满足. 图 4 则是基于式(9)的软件小工具对图 2 中实验相关设计参数进行验证的结果.

|                  |                                      |                                                             |                                   |
|------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Pass!</b>     |                                      | Maximum Rate Decline<br>a <input type="text" value="0.22"/> |                                   |
| Upper limit      | <input type="text" value="0.24719"/> | Parameters                                                  |                                   |
|                  |                                      | Y (MPa)                                                     | <input type="text" value="250"/>  |
|                  |                                      | A (mm <sup>2</sup> )                                        | <input type="text" value="100"/>  |
|                  |                                      | $\varepsilon_{\text{max}}$                                  | <input type="text" value="0.3"/>  |
|                  |                                      | $\bar{\dot{\varepsilon}}$ (1/s)                             | <input type="text" value="820"/>  |
|                  |                                      | H (mm)                                                      | <input type="text" value="10"/>   |
|                  |                                      | MB (kg)                                                     | <input type="text" value="6.7"/>  |
|                  |                                      | Mt (kg)                                                     | <input type="text" value="16.8"/> |
| Calculated Value | <input type="text" value="0.23287"/> |                                                             |                                   |

图 4 对应图 2 的实验相关参数评价

实际应用中, 在提出实验要求后, 可以用式(9)来进行相关参数的选择及其评价. 例如, 对某种平均屈服应力为 200 MPa 的材料, 采用  $\Phi 74$  mm, 长 3 m 的撞击杆与透射杆, 在试件截面为 8 mm  $\times$  8 mm  $\times$  12 mm, 实验应变率降幅为 0.2, 且待测最大应变为 0.1 的条件下, 其实验平均应变率下限约在  $10^2 \text{ s}^{-1}$  左右.

#### 4 结论及讨论

本文提出了采用直接撞击来实现材料大变形冲击压缩动态应力—应变曲线测试的实验方法, 结果显示能有效地实现冲击大变形实验, 效果良好, 简单易行; 且给出了直撞式压杆实验的设计条件准则, 便于工程应用.

直撞式实验时, 试件中应力均匀性是需要考虑的问题. 从理论分析来看, 直接撞击实验时, 试件中的应力均匀性相对较差, 但对于实体材料测试而言, 由于其在较低应变率下变形时间较长, 因此在大多数情况下可满足均匀性要求<sup>[8]</sup>. 而当直撞式压杆用于软体材料或泡沫材料测试时, 更容易实现大变形及较低的实验应变率, 但由于此类材料中的应力波波速通常很低, 此时均匀性问题就需要有针对性地予以考虑.

文中所提方案中可以采用更长的撞击杆. 从实现大变形的角度, 当撞击杆与透射杆等径, 撞击杆与透射杆等长时为最佳设计. 但在使用长撞击杆时, 应力波在其中的传播应予以考虑, 采用与透射杆中类似的反演方法, 技术上并无困难.

直撞式霍普金森杆的一个不足之处是其所测应力—应变曲线的初始段较标准霍普金森杆实验所测曲线初始段更为倾斜, 主要原因是由于其试件与压杆间的接触相对不够理想所致. 尽管一般认为霍普金森杆实验所测得的弹性段是无效的, 但仍可考虑引入某种修正来予以解决.

#### 参考文献:

- [1] Gray III G T. Classic Split-Hopkinson Pressure Bar Testing[M]//Kuhn H, Medlin D. SAM Handbook, Mechanical Testing and Evaluation, Vol. 8, Materials Park, OH: ASM International, 2000:462-476.
- [2] Chen W W, Song B. Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design Testing and Applications[M]. New York: Springer

- Press, 2015.
- [3] 韩李斌, 杨黎明. 泡沫混凝土动态力学性能及破坏形式[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(1):68-72.
- [4] 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 & Physics of Solids, 1997, 45(7):1185-1202.
- [5] 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.
- [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: Mathematical and Physical Sciences, 1992, 438(1902):153-170.
- [7] Park S W, Zhou M. Separation of elastic waves in split Hopkinson bars using one-point strain measurements[J]. Experimental Mechanics, 1999, 39(4):287-294.
- [8] 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.

## A direct impact Hopkinson pressure bar technique for material testing in large deformation

CHEN Hao, GUO Xin, SONG Li<sup>\*</sup>

( Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China )

**Abstract:** As a major method of mechanical property test under high strain rate, the time duration of the Hopkinson Bar test is limited by the length of the pressure bars, and the specimen can't achieve large deformation in a wide range of strain rate. In this paper, an experimental technique for large deformation loading with finite bar length is presented. The traditional method of direct impact test for ultra-high strain rate test has been applied to the dynamic performance testing of materials in relatively lower strain rate. Using this technique, the dynamic stress-strain curve of materials under the strain rate in the order of  $10^2 \text{ s}^{-1}$  can be obtained. Practical application shows that the method is simple and effective. The range of application of the technique, the geometrical parameters of the experimental device and the influence of the material parameters on the test results are also discussed.

**Key words:** direct impact; Hopkinson pressure bar; large deformation

(责任编辑 章践立)