文章编号:1000-5773(2008)02-0187-05

单脉冲加载的 Hopkinson 压杆实验中预留缝隙确定方法的研究*

陈 荣,卢芳云,林玉亮,覃金贵

(国防科学技术大学理学院,湖南长沙 410073)

摘要:在传统 Hopkinson 压杆实验中,反射拉伸波在入射杆的撞击端反射形成压缩波,导致实验过程中对试样进行了多次加载,单脉冲加载的 Hopkinson 压杆实验技术解决了该问题。详细总结了单脉冲加载的 Hopkinson 压杆实验技术原理,给出了法兰盘与质量块间预留缝隙的计算方法,分析了预留缝隙不同大小对实验结果的影响。建立了一套单脉冲加载的 Hopkinson 压杆实验装置,并利用高速摄影验证了实验技术的可靠性。

关键词:固体力学;Hopkinson 杆;单脉冲加载;高速摄影

中图分类号:O347 **文献标识码**:A

1 引 言

自 1914 年 B. Hopkinson 提出 Hopkinson 压杆技术,到 1949 年 H. Kolsky 最终建立了传统的分离式 Hopkinson 压杆(或 Kolsky 杆)技术,又经过了半个多世纪的系统与深入研究,Hopkinson 压杆实验技术得到了广泛的应用。但是,在常规的 Hopkinson 压杆技术中,由于反射拉伸波在入射杆的撞击端反射形成压缩波,对试样形成二次加载,导致回收试样冲击状态所反映的受载情况与实验曲线不相一致。为解决该问题,S. Namat-Nasser 在 1991 年提出单脉冲加载的 Hopkinson 压杆技术[1],后来又有部分改进[2],另外 W. Chen 等又在此基础上对实验装置做了进一步的简化[3]。国内方面,李玉龙等[4]首先引入了单脉冲加载的 Hopkinson 压杆技术,主要是用来研究铝合金在高变形速率下的损伤演化过程,关于此项技术的介绍目前散见于部分文献[5-6]。

本文系统介绍了单脉冲加载实验技术的原理及实现方法,并在此基础上给出了法兰盘与质量块间预留缝隙的计算方法。在国防科技大学理学院工程力学实验室建成了单脉冲加载的 Hopkinson 压杆实验装置,并采用高速摄影验证了实验方案的可靠性,证明所建立的实验装置能够保证对试样仅有一次加载。

2 单脉冲加载的 Hopkinson 压杆实验技术原理

2.1 S. Nemat-Nasser 单脉冲加载实验技术原理

应力反转的 Hopkinson 装置由 S. Nemat-Nasser 在 1991 年提出[1],通过重新设计加载装置和入射杆的加载端,如图 1(a)所示,可以在入射杆中产生一个由压缩部分和紧随其后的拉伸部分组成的应力波。

将入射杆的加载端加工成一个传递法兰(Transfer Flange)。入射管(Incident Tube)是和子弹等长的圆筒,与子弹和入射杆横截面积相同,材料相同,波阻抗相同。反应质量块(Reaction Mass)是入射杆

* **收稿日期**:2007-07-20;**修回日期**:2007-10-30

基金项目:国家自然科学基金(10672177);国防科技大学预研基金(JC07-02-06)

作者简介:陈 荣(1981—),男,博士研究生,主要从事材料动态力学性能研究. E-mail:cr27251345@163.com

通讯作者:卢芳云(1963—),女,教授,主要从事材料动态响应研究. E-mail:Fylu@nudt.edu.cn

穿过其中的钢制大圆筒。入射管安装在传递法兰和反射质量块之间。当子弹以速度 v_0 撞击传递法兰时，从接触面质点速度方程和轴向动量守恒可得，入射杆和入射管中的质点速度均为 $v_0/3$。在入射杆和入射管中都会产生压缩波。入射杆中的压缩波传到试样端面对试样进行加载，而入射管中的压缩波传播到反射质量块端面会反射一个压缩波，与从子弹自由面反射的拉伸波同时到达传递法兰与入射管的交界面，子弹开始回弹。由于入射管和入射杆横截面积相同，材料相同，传递法兰被入射管加载一个等幅度的拉伸波。于是向入射杆中传进一个紧随压缩波的拉伸波，图 1(b)是典型入射波形。

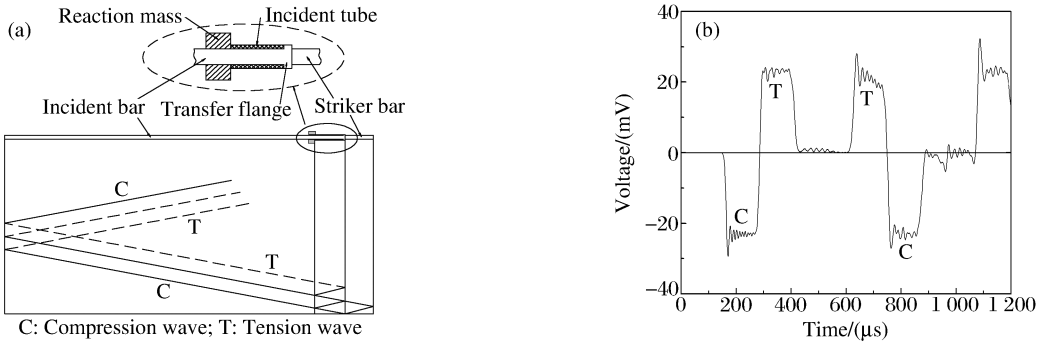


图 1 S. Nemat-Nasser 单脉冲加载实验技术原理(a)及典型入射波形(b)

Fig. 1 S. Nemat-Nasser's single-pulse loading technique (a) and typical incident wave (b)

由于入射管的存在，法兰盘所承受的拉伸应力数值上等于入射压缩应力的值，若子弹撞击速度较高时，需要容易将法兰盘与杆的连接处拉断(如它和杆是一体的，可能在连接处剪断，如由螺丝连接，则可能将螺丝拉断)。1997 年 S. Nemat-Nasser[2] 又在原实验基础上作了部分改进，在入射管和传递法兰间预置一个间隙，当子弹撞击入射杆时，在入射杆产生的变形量正好等于预设间隙。这时，传递法兰与入射管紧密接触。通常的 Hopkinson 压杆的二次加载是由于反射拉伸波在入射杆的撞击端反射形成的压缩波(此时子弹已经与入射杆分离)，而在此装置中，反射拉伸波被入射管完全吸收。国内李玉龙等也是采用的此设计方案[4-5]。

2.2 W. Chen 单脉冲加载实验技术原理

在 S. Nemat-Nasser 方案的改进设计中，入射管已经不是必需的了，W. Chen 给出了更简单的设计[3]。当反射拉伸波到达法兰时，由于质量块的限制，相对于拉伸波是一个固壁界面，反射一个拉伸波。不会再对试样有压缩波加载，从而实现了单脉冲加载。波系分析如图 2(a)所示。入射杆应变片所测的典型波形如图 2(b)所示。由图中可以看到，反射拉伸波传到法兰处反射回去的还是拉伸波，因此基本不会再对试样有压缩波加载。在此技术中，法兰盘与质量块之间的预留缝隙设置是一个关键环节，如图 2 中小图所示。

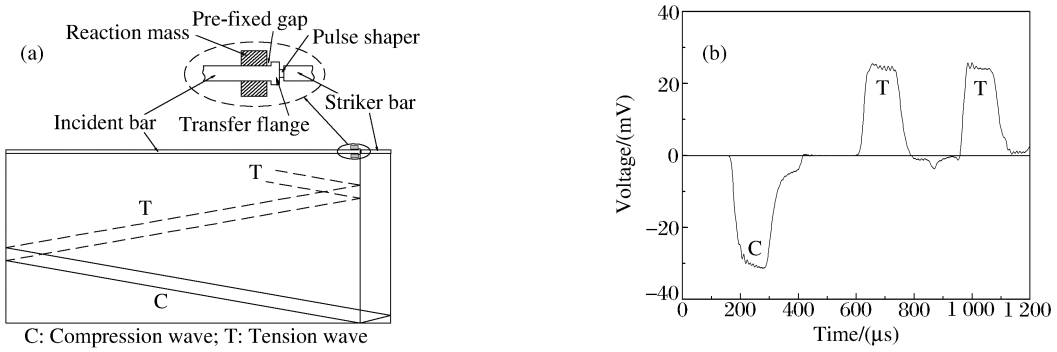


图 2 W. Chen 单脉冲加载实验技术原理(a)及入射杆中典型波形(b)

Fig. 2 W. Chen's single-pulse loading technique (a) and typical wave in the incident bar (b)

3　实验及验证

3.1　实验装置

实验是在国防科技大学理学院工程力学实验室原有的分离式 Hopkinson 压杆实验平台基础上改进而成的,采用 W. Chen 单脉冲加载实验方案。实验中所有压杆均采用 LC4 铝合金杆,压杆直径 20 mm,密度 2.85 g/cm^3,杨氏模量 71 GPa,杆中弹性波波速为 4 991 m/s。入射杆长 1 800 mm,透射杆长 1 000 mm,子弹长度为 300 mm。法兰直径 30 mm、厚 10 mm,采用 M10 螺纹与压杆被撞击端连接,钢制质量块直径 100 mm、长 120 mm、质量约 7 kg,采用 C 字钳与实验平台固定。

3.2　预留缝隙设计

根据前述理论分析,当反射拉伸波到达入射杆撞击端时,预留缝隙刚好闭合。而子弹撞击结束后反射拉伸波到达前实验杆的撞击端位移为零,故预留缝隙大小即为子弹撞击结束时入射杆撞击端的位移。若长为 l_0 子弹以速度 v_0 撞击入射杆,对称碰撞,入射杆中的波后质点速度为 $v=v_0/2$,而入射波宽度为 $t=2l_0/C_0$,于是预留间隙为

$$\Delta l = vt = l_0 v_0 / C_0 \tag{1}$$

当采用整形器时,采用实验标定预留间隙更为准确。先不加质量块,子弹以速度 v_0 撞击入射杆,测出入射杆中的应变 ε_i,最终可计算得到入射杆的位移

$$s = \int_0^T \varepsilon_i C_0 \, \mathrm{d}t \tag{2}$$

积分区域 T 为加载脉宽。

实验中子弹加载速度为 5 m/s,试样为聚氨酯泡沫,为获得常应变率加载采用⌀6.5 mm×5 mm 的黄铜整形器。根据(1)式计算预留缝隙为 0.30 mm,根据(2)式计算预留缝隙为 0.32 mm,如图 3 所示。这是由于黄铜整形器的引入,使入射波卸载不完全,加载脉宽变大,最终导致入射杆加载端位移略大。

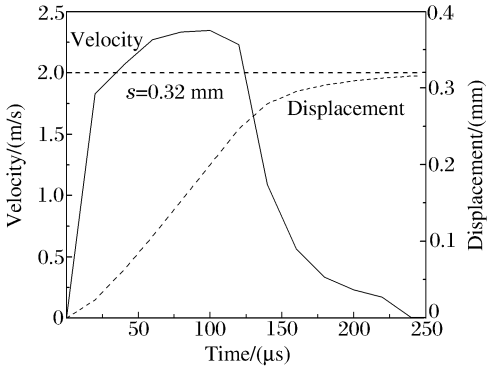
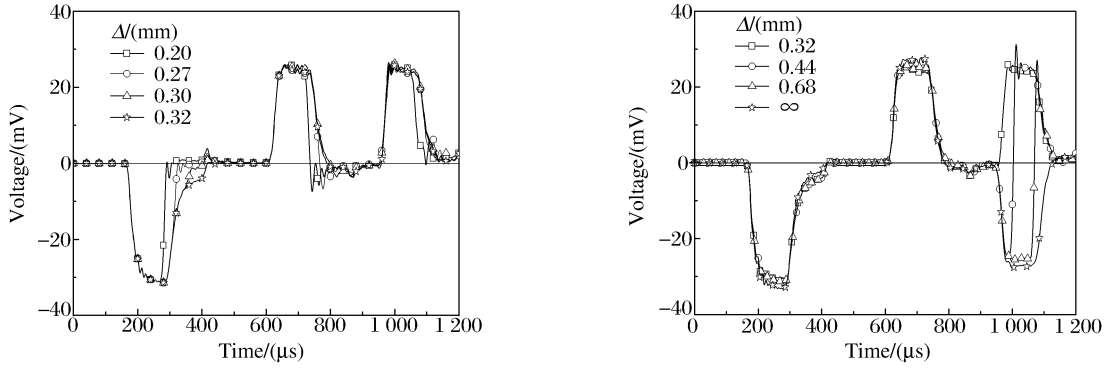


图 3　预留缝隙计算

Fig. 3　The way to calculate the pre-fixed gap

为考证不同预留缝隙对实验结果的影响,取 0.20、0.27、0.30、0.32、0.44、0.68 mm、∞等 7 种预留缝隙进行比较。图 4 为不同预留缝隙条件下入射杆实验波形的对比。当预留缝隙小于理论值 10%时(2.7 mm),对实验结果的影响不大,但随着预留缝隙的进一步减小,入射波的波尾会被质量块"吃掉"一部分,使得入射波形不完整,但不会对试样进行二次加载,如图4(a)所示。当预留缝隙大于理论值时会



(a) Pre-fixed gap smaller than academic value　　(b) Pre-fixed gap larger than academic value

图 4　不同预留缝隙时实验波形比较

Fig. 4　Tests of different pre-fixed gaps

有部分的二次反射压缩波对试样进行加载，随着缝隙的增加二次压缩加载不断增加，如图 4(b)所示。说明在预留缝隙设置时，在小于理论值 10%范围内可以保证对试样的单脉冲加载，通常的塞尺可以满足此项精度要求。

3.3 高速摄影验证

采用 Photron 公司 FASTCAM SA 1 高速摄像系统来验证是否对试样进行了单脉冲加载。镜头为 12 bits CMOS 传感器，快门为 2 μs 球形电子快门，相机在全画幅 1 024×1 024 的分辨率下能够达到 5 400 fps 的拍摄速度，在降低分辨率的情况下拍摄速度最高可以达到 150 000 fps。实验采用 512×218 分辨率，将影像的帧频率设置为 50 000 fps，每 20 μs 拍摄一张，要确定是否对试样进行了单脉冲加载，就是看反射波二次反射时是否对试样进行第二次压缩加载。

图 5 为未采用单脉冲加载下泡沫试样的压缩变形照片。从图中可以看出，在加载开始时(t=0)，入射杆的端面处于右起第 3 根经线与第 4 根经线之间；在第一个脉冲加载结束时(t=200 μs)，入射杆端面接近右起第 4 根经线；在二次反射波到达时(t=740 μs)，入射杆开始对试样进行第二次加载，到 t=800 μs时入射杆端面几乎和右起第 4 根经线平齐。说明试样受到第二次压缩波的加载，与图 4(b)中预留缝隙为∞的实验波形相对应。

图 6 为采用单脉冲加载下泡沫试样的压缩变形照片。从图中可以看出，在加载开始时(t=0)，入射杆的端面处于右起第 3 根经线处；在第一个脉冲加载结束时(t=200 μs)，入射杆端面处于右起第 3 根经线与第 4 根经线之间；在二次反射波到达时(t=740 μs)，入射杆略微超出第 3 根经线，到 t=800 μs 时入射杆端面又几乎和右起第 3 根经线平齐，说明二次反射的是拉伸波，试样没有受到第二次加载。与图 4(b)中预留缝隙为 0.32 mm 的实验波形相对应，高速摄影证明所设计的单脉冲加载装置能够抑制二次反射波，实现对试样的单脉冲加载。

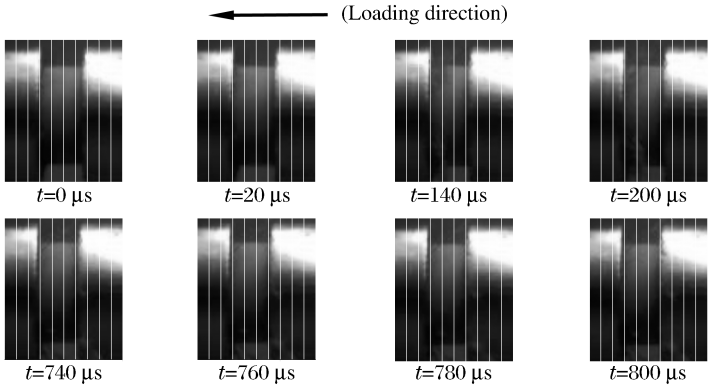


图 5 未采用单脉冲加载下泡沫试样的压缩变形照片

Fig. 5 Photos of a foam sample loaded by traditional Hopkinson pressure bars

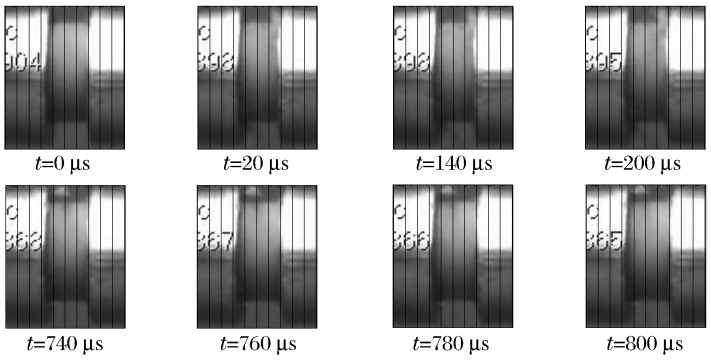


图 6 采用单脉冲加载后泡沫试样的压缩变形照片

Fig. 6 Photos of a foam sample loaded by single-pulse loading Hopkinson pressure bars

4 结　论

本文首先介绍了单脉冲加载 Hopkinson 压杆实验技术原理;然后对现有实验装置进行改进,建立了单脉冲加载的 Hopkinson 压杆实验系统,给出了法兰盘与质量块间预留缝隙的计算方法,研究了不同预留缝隙对实验结果的影响,实验中预留缝隙取值小于理论值 10%范围内均可有效地实现单脉冲加载;最后,采用高速摄影验证了实验装置的可靠性,实验波形与高速摄影的结果均表明,所建立的单脉冲加载 Hopkinson 压杆实验装置能有效地抑制对试样的二次加载。

References:

[1] Nemat-Nasser S, Isaacs J B, Starrett J E. Hopkinson Techniques for Dynamic Recovery Experiments [A]//Mathematical and Physical Sciences [C]. London: Proc R Soc, 1991: 371-391.

[2] Nemat-Nasser S, Isaacs J B. Direct Measurement of Isothermal Flow Stress of Metals at Elevated Temperatures and High Strain Rates with Application to Ta and Ta-W alloys [J]. Acta Mater, 1997, 45(3): 907-919.

[3] Song B, Chen W. Loading and Unloading Split Hopkinson Pressure Bar Pulse-Shaping Techniques for Dynamic Hysteretic Loops [J]. Exp Mech, 2004, 44(6): 622-628.

[4] Li Y L, Ramesh K T, Chin E S C. Viscoplastic Deformation and Compressive Damage in an A359/SiCp Metal-Matrix Composite [J]. Acta Mater, 2000, 48: 1536-1573.

[5] Li Y L, Guo W G, Xu F. The Extended Application of Hopkinson Bar Technique [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(5): 385-394. (in Chinese)
李玉龙,郭伟国,徐　绯. Hopkinson 压杆技术的推广应用 [J]. 爆炸与冲击,2006,26(5):385-394.

[6] Guo W G. Plastic Flow Behavior and Constitutive Relation of BBC Metals [D]. Xi'an: Northwest University of Technology, 2007: 36-37. (in Chinese)
郭伟国. BBC 金属的塑性流动行为及其本构关系研究 [D]. 西安:西北工业大学,2007:36-37.

Investigation of the Pre-fixed Gap in Single-Pulse Loading Technique of Hopkinson Pressure Bars

CHEN Rong, LU Fang-Yun, LIN Yu-Liang, QIN Jin-Gui

(*College of Science, National University of Defense Technology, Changsha* 410073, *China*)

Abstract: In conventional Split Hopkinson Pressure Bars(SHPB) experiments, the tension pulse reflected from the sample back into the incident bar will travel to the free end of the bar and then will reflect back to the sample as compression wave. As a result, the sample is loaded many times. The single-pulse loading technique of the Hopkinson pressure bars can solve the problem. This paper presents the basic principle of the single-pulse loading technique of Hopkinson pressure bars. The way to calculate the pre-fixed gap between the transfer flange and reaction mass is given. The experimental results with various pre-fixed gap are obtained. A device of the single-pulse loading technique is set up. High speed photography is applied to confirm the validation of the technique. Both the photoes and the experimental strain waves show that sample was loaded only once.

Key words: solid mechanics; Hopkinson pressure bar; single-pulse loading; high speed photography