

文章编号: 1001-4888(2012)05-0558-07

冲击拉伸实验装置的研制及其试验研究^{*}

邹广平¹, 唱忠良¹, 王丹¹, 董丹丹², 王新征³

(1. 哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨 150001; 3. 西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 材料动力学试验技术远比准静态力学中的复杂, 为了模拟各种速率的冲击加载过程, 试验装置设计就成为关键问题之一。特别是针对材料动态拉伸性能的测试, 目前的冲击拉伸装置还没有统一标准, 因此本文基于一维弹性应力波原理设计了一套双气室间接杆-杆型冲击拉伸试验装置。该装置采用了双气室对称布置的方式, 通过气体转换器实现气路的转换, 克服了现有气动式冲击拉伸设备结构复杂、密封要求严格的缺点。本文利用该装置对 2A12T4 铝合金试件的冲击拉伸性能进行了测试, 并数值分析了应力波在杆系和试件中的传播效应。通过试验测试和数值分析论证了该冲击拉伸装置实验的可靠性和设计的合理性。

关键词: 冲击拉伸; 分离式霍普金森拉杆; 一维应力波; 双气室; 数值分析

中图分类号: O347.3 **文献标识码:** A

0 引言

爆炸、高速撞击、金属切削等是工程中较为常见的冲击载荷, 这类载荷的特点是作用时间很短(一般为微秒或纳秒级)、冲击强度高(足以引起材料的破坏)。材料在动态载荷作用下所表现出的力学性能与在静态或准静态时的力学性能有很大的不同, 所以研究材料在冲击载荷下的力学性能具有十分重要的工程意义和学术价值。为了模拟各种速率的冲击加载过程, 试验装置设计就成为关键问题之一^[1,2]。有关材料的动态拉伸性能问题正在成为人们讨论、研究的热点, 而该种试验装置还处在不成熟阶段, 暂时还没有形成一个统一的标准^[3]。

目前的高应变率冲击拉伸装置大多按照间接杆-杆型分离式霍普金森拉杆原理进行研制。这种装置的共同点是皆由拉伸杆系、使撞块加速的动力发生器和信号记录系统组成。其关键是动力发生器的设计, 此亦为各个装置最大的区别之处。

动力发生器的作用是驱动撞块并使其具有一定的冲击速度, 已有冲击拉伸装置的动力发生器主要可以分为机械式和气动式两种。采用机械式动力发生器的主要有中国科学技术大学研制的间接杆-杆型旋转圆盘冲击拉伸试验装置^[4,5]、摆锤式间接杆-杆型冲击拉伸装置^[6]。机械式主要存在的不足在于机构复杂、冲击速度可调范围小而推广面较小, 故目前的设计多采用气动式。已有的气动式装置主要包括上海大学研制的气枪式冲击拉伸试验装置^[7]、国防科大研制的压拉通用霍普金森杆装置^[8]和中国科学技术大学研制的气枪式变截面间接杆-杆型拉伸试验装置等^[9]。目前的气动式通常采用高压气体作为动力源, 通过高、低压气体的进气、排气来推动气室内部活塞的往复运动, 从而实现高压气体的快速释放, 并以其推动撞块。此装置的缺点是对气室和气路的密封要求比较严格, 在制造上比较困难。

^{*} 收稿日期: 2012-06-01; 修订日期: 2012-08-15

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(200923041100); 中央高校基本科研业务费项目(HEUCF100211; HEUCF110205)

通讯作者: 邹广平(1963—), 男, 教授, 博士, 冲击动力学。E-mail: gpzou@hotmail.com

本文依据间接杆-杆型分离式霍普金森拉杆的设计思路,采用气动式设计了一种新型的冲击拉伸实验装置。该试验装置的动力发生器采用对称布置双压气枪,通过气体转换器来改变普通压气枪发生气体的运动路径和运动方式,从而实现高压气体推动圆环形撞块的高速运动。利用该冲击拉伸实验装置测试了2A12T4铝合金材料的动态冲击拉伸性能,验证了实验装置的有效性,同时数值分析了应力波在杆系和试件中的传播规律。

1 间接杆-杆型冲击拉伸装置的实验原理

间接杆-杆型冲击拉伸试验装置主要是依据一维应力波原理,基于两个假设:1)一维假定(平面假定)。在输入杆、输出杆和试件中传播单向应力状态的一维应力波,忽略输入杆、输出杆和试件中质点的横向惯性效应。2)均匀化假定。假定试件中应力沿轴向均匀,忽略了波在试件中的传播效应,从而使细杆的动力学方程简化为一维杆的动力学平衡方程。测试装置的示意图如图1所示。

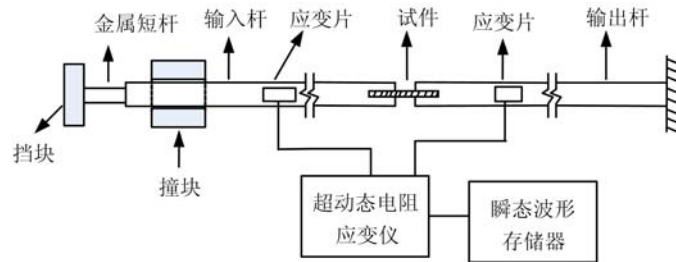


图1 间接杆-杆型冲击拉伸装置示意图

Fig.1 The schematic diagram of indirect bar-bar impact tensile apparatus

从图1可以看出,间接杆-杆型冲击拉伸装置基本组成包括输入杆、输出杆、金属短杆、撞块、挡块、应变片、超动态电阻应变仪和瞬态波形存储器。撞块通常由动力发生器推动,向着输入杆左端以一定的速度运动。当撞块撞击到挡块时,挡块会拉断与之连接的金属短杆。金属短杆的快速拉断会使入射杆的前端产生拉伸脉冲,此拉伸波将会沿着输入杆传播,且在传播到试件后,一部分反射回输入杆中形成反射波,一部分拉断试件并传入输出杆中形成透射波。测试过程中假设试样长度远小于输入杆和输出杆长度,当脉冲通过试样时,由于脉冲传播时间远远大于试样中波的传播时间,因此脉冲可以在试样内部发生多次反射,并达到应力平衡。故可略去试样中波的传播效应,并认为试样两侧轴向力相等,从而可以依据一维线弹性杆波动理论计算试样的动态响应,计算公式如下:

$$\sigma_s = \frac{AE}{A_s} \epsilon_i, \quad \epsilon_s = -\frac{2C_0}{l_0} \int_0^t \epsilon_r dt, \quad \dot{\epsilon}_s = -\frac{2C_0}{l_0} \epsilon_r \quad (1)$$

亦可以利用公式 $\epsilon_r = \epsilon_i - \epsilon_t$ 把上面的公式变换为:

$$\begin{cases} \sigma_s = \frac{1}{2} \frac{EA}{A_s} (\epsilon_i + \epsilon_r + \epsilon_t) \\ \epsilon_s = \frac{C_0}{l_0} \int_0^t (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) dt \\ \dot{\epsilon}_s = \frac{C_0}{l_0} (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\epsilon_i, \epsilon_r, \epsilon_t$ 分别为测试记录的入射波、反射波和透射波; C_0 是杆中弹性波纵波波速; l_0 为试件的长度; E 为杆的弹性模量; A 为杆的截面积; A_s 为试件的截面积。

入射波、反射波和透射波通过粘贴在输入杆和输出杆上的应变片得到,应变信号通过超动态电阻应变仪进行放大传入瞬态波形存储器中,从而记录并显示出入射波曲线、反射波曲线和透射波曲线。利用公式(1)或公式(2),即可以通过间接测量杆上的应变来计算材料的应力-应变数据。

2 冲击拉伸试验装置的设计

双气室间接杆-杆型冲击拉伸试验装置的组成如图2(a)所示,装置图如图2(b)所示。动力发生器

的设计如图 3(a)所示。以往气动式冲击拉伸装置的设计大多是将传统的压气枪中心掏空,形成入射杆穿过通道,即中空压气枪装置,这样导致气枪设计复杂、对气路密封要求严格。在本设计中,采用了传统气枪对称布置方式,利用气体转换器实现气体转换并形成入射杆的穿过通道。其工作原理是利用气压控制台控制高压气源同时给左气枪和右气枪进行充气 and 放气,左、右气枪释放的高压气体通过气体转换器内部的连通空腔混合后,推动环形撞块沿着外套管和内套管所组成的圆环形滑道加速前进。环形撞块射出动力发生器的外套管时,其速度达到最大。套管口处安装有时间间隔仪,当撞块通过时间间隔仪时,时间间隔仪显示环形撞块通过已设定距离的时间。

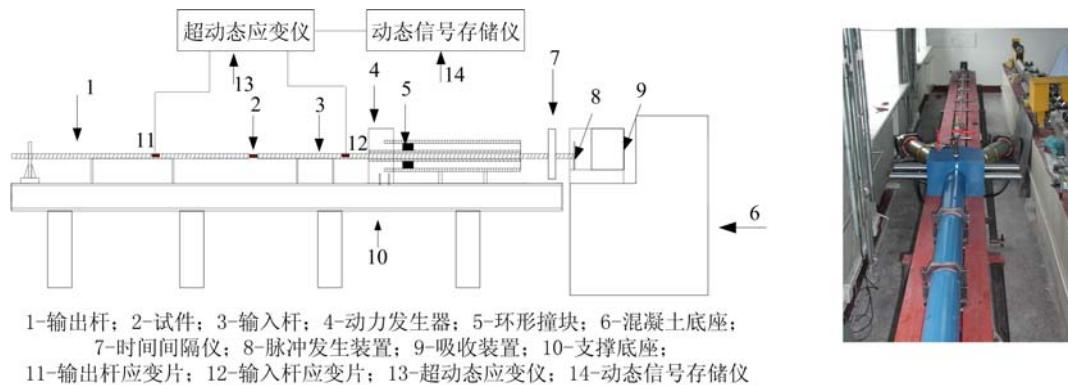


图 2 (a) 冲击拉伸装置组成示意图; (b) 冲击拉伸实验装置图

Fig. 2 (a) Schematic diagram of impact tensile apparatus structure, (b) Impact tensile testing apparatus

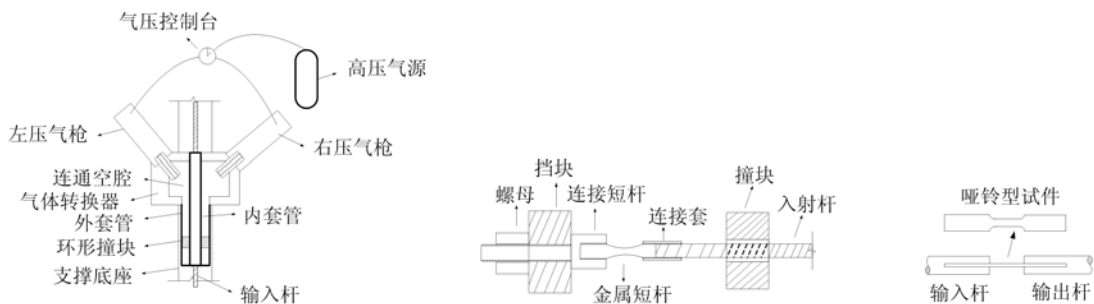


图 3 (a) 动力发生器装置示意图; (b) 应力脉冲发生装置示意图; (c) 试件的连接

Fig. 3 (a) Schematic diagram of apparatus for power produce apparatus,
(b) Schematic diagram of apparatus for stress wave produce apparatus, (c) the connection between specimen

应力脉冲发生装置示意图如图 3(b)所示,当环形撞块通过时间间隔仪后会继续前进,并撞击到挡块上。当环形撞块撞击挡块时,就会通过连接短杆快速拉伸金属短杆,拉断后的金属短杆、环形撞块、挡块、连接杆和螺母会飞到吸收装置中,而它们撞击吸收装置的能量最后会被混凝土底座吸收。由于金属短杆受到冲击载荷作用,会产生拉伸脉冲,该脉冲通过连接套作用在输入杆上,从而使输入杆中产生拉伸应力脉冲。拉伸应力波脉冲在输入杆中传播,经过输入杆应变片时,应变片会记录入射波脉冲波形并通过导线传给超动态应变仪,超动态应变仪将数据放大后通过导线传递给动态信号存储仪记录入射波数据。输入杆中的入射波继续传播后作用于试件,一部分入射波将作用在试件上并传播到透射杆中形成透射波,一部分入射波将在界面反射后在入射杆中形成反射波。同样,透射波和反射波都会被贴在输出杆和输入杆上的应变片记录,并通过导线传送给超动态应变仪,超动态应变仪将信号放大后传送给动态信号存储仪中储存。通过分析动态信号存储仪中记录的入射波数据、反射波数据和透射波数据,将其代入公式(1)或者公式(2)中即可得到试件在高应变率下的力学参数。

冲击拉伸的试件采用哑铃型试件,如图 3(c)所示,在输入杆和输出杆端部留有缺口,该缺口与试件相配合,试件通过高强粘结剂与输入杆和输出杆相连接。

3 2A12T4 铝合金试件冲击拉伸试验

目前的冲击拉伸试验装置多采用 2A12T4(旧牌号为 LY12cz) 铝合金材料的冲击拉伸试验来验证装置的可靠性, 本文亦采用哑铃型 2A12T4 铝合金试件进行冲击拉伸试验以验证装置的可靠性。2A12T4 铝合金试件及其尺寸如图 4(a) 所示。

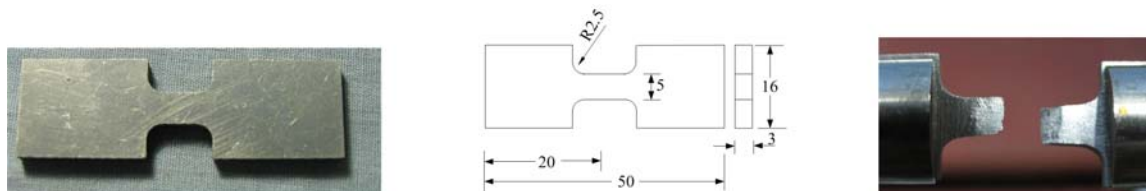


图 4 (a) 2A12T4 铝合金试件及其尺寸图(mm); (b) 试件断口图

Fig. 4 (a) 2A12T4 aluminum alloy specimen and its dimension, (b) figure of specimen fracture

实验时气枪内的压强为 0.6MPa, 时间间隔仪测得的子弹通过时间为 3.400ms, 平行光管的距离是 5cm, 因此子弹的速度为 14.71m/s。试件被拉断, 其拉断图如图 4(b) 所示。

实验测试得到的入射波、反射波和透射波形曲线如图 5(a) 所示, 其中电压和应变关系为 1V 对应 $480\mu\epsilon$ 。将得到的波形数据通过公式(1)计算, 可得到材料在测试过程中的应变率—时间曲线(如图 5(b) 所示), 以及动态应变—应力曲线(如图 5(c) 所示)。通过图 5(b) 可知, 本次实验应变率为 $1300s^{-1}$, 通过图 5(c) 可以看出材料的屈服极限约为 450MPa。这与文献[4]完成的 2A12T4 在应变率为 $1300s^{-1}$ 时所得到的结果一致。因此本文设计的实验测试系统是可靠的。

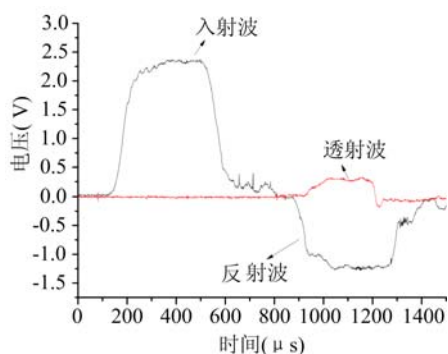


图 5 (a) 实验测得的入射波、反射波、透射波

Fig. 5 (a) Incidence wave, reflect wave and transmitted wave which tested in the experiment

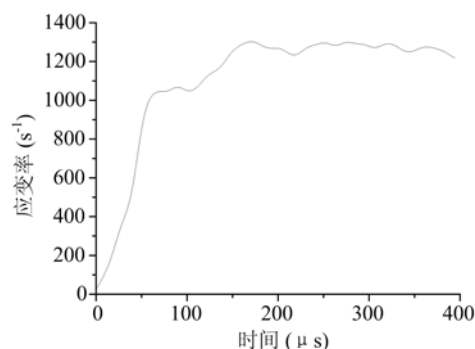


图 5(b) 实验数据计算得出的应变率—时间曲线

Fig. 5 (b) Strain rate-time curve calculated from experiment

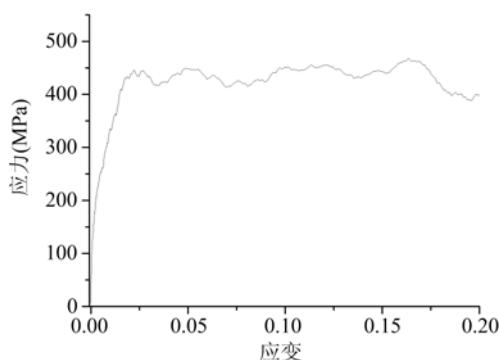


图 5(c) 实验数据计算得出的应力—应变曲线

Fig. 5 (c) Strain-stress curve calculated form experiment

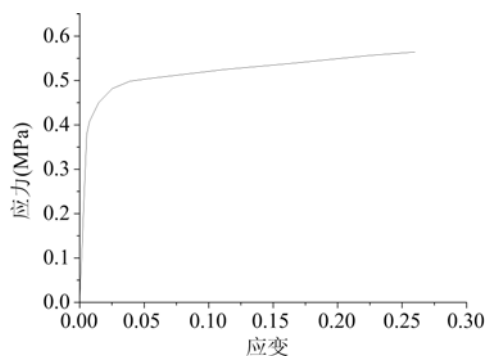


图 6 2A12T4 材料的应力—应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of 2A12T4 material

4 应力波在杆系和试件中的传播

由于冲击拉伸实验的本质是应力波在杆系与试件中的传播,而应力波动态传播过程很难在实验中直接观察,数值分析则可以弥补这方面的缺陷。通过数值分析可以观察到应力波在所研制设备杆系中的传播及试件受力情况,从而验证杆系与试件设计的合理性,并可以观察在应力波作用下试件的响应情况。

应力波在杆系和试件中的传播数值模拟采用 ANSYS/LS-DYNA 软件,数值模型与实际模型尺寸相同,输入杆与输出杆长均为 2m,直径为 16mm,试件尺寸与图 4(a)的试件尺寸一致,2A12T4 试件的应力—应变关系与文献[5]相同,如图 6 所示,输入杆和输出杆均为钢杆,两种材料参数见表 1。由于杆系是对称结构,因此采用四分之一模型分析即可。

表 1 数值分析中的材料参数

Tab.1 Material parameter for numerical simulation

材料	弹性模量(GPa)	密度(kg/m ³)	泊松比	屈服强度(GPa)
铝合金	70	2700	0.32	0.3785
杆系	210	7850	0.28	0.8

有限元分析的单元类型采用 solid164 实体单元,单元划分采用 8 节点 6 面体单元,试件试验段单元长为 1mm,宽为 0.5mm。厚度方向为 2 等分。模型的网格划分如图 7 所示。在设置杆系的载荷边界条件时,为了使数值模拟与实际情况相接近,在施加载荷时采用铝合金试件冲击拉伸实验所测试到的入射波数据作为冲击载荷施加在入射杆的左端,如图 8 所示。在输出杆的右端加固定约束。

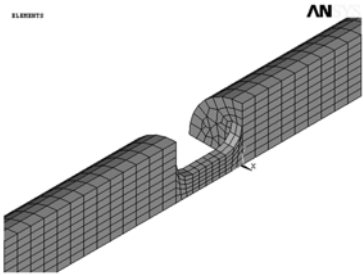


图 7 模型网格划分
Fig. 7 Meshing of model

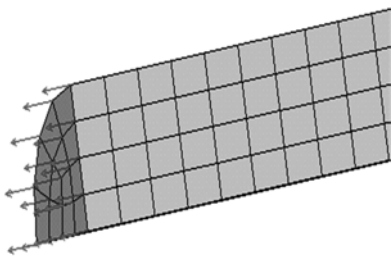


图 8 入射杆端部载荷图
Fig. 8 Scheme of load act on the incidence bar

结果分析中,选取数值模型中输入杆中间处横截面中心点和外表面点单元,输出其轴向应变-时间曲线,并与该点利用应变片测试得到的应变-时间曲线绘制在同一图中,如图 9 所示,图中可以看到中心点单元处应变-时间曲线和外表面点单元的应变-时间曲线几乎重合,且他们与实验测试得到的应变曲线误差很小,说明应力波在输入杆中的传播符合一维应力波假定。

应力波在 $t=550\mu\text{s}$ 时作用在试件上的应力分布图如图 10 所示。可以看出试件受力时其实验测试段的应力分布均匀,说明试件形状的选择是合理的。提取试件试验段中部最大受力时各方向应力数据如表 2 所示(z 轴为主方向)。从表 2 中可以看出,试件在受冲击载荷时,试件的实验段主方向应力较大,且应力均匀,其它方向的力则不明显。因而可看出在应力波传播过程中,试件的轴向应力是主要的,其它应力的幅值都比较小,即使是应力值较大的 σ_y 也只有 σ_z 的 20%,所以试件的设计是合理的。

表 2 最大受力时试件中部的各个应力分量(MPa)

Tab.2 The stress component of specimen mid-section when the specimen under max force(MPa)

时间	σ_z	σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
550 μs	445	45	90	-2.8	-14	17.8

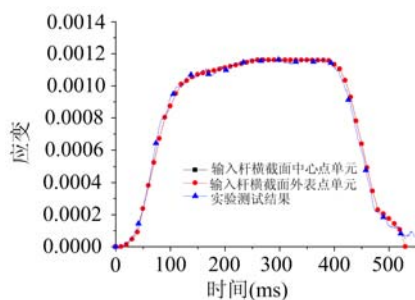


图9 输入杆横截面单元数值模拟
与实验测试的应变-时间曲线

Fig. 9 Strain-time curves of input bar cross section elements numerical simulation and experiment test

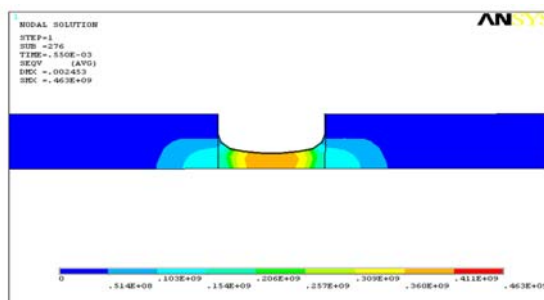


图10 $t=550$ 时应力波在试件中的应力分布云图

Fig. 10 Specimen stress wave schematic diagram when $t=550\mu s$

5 结论

本文在前人研究的基础上,研制出了一套能够实现材料冲击拉伸性能测试的试验设备——双气室间接杆-杆型冲击拉伸试验装置。通过 2A12T4 铝合金试件的冲击拉伸实验验证了冲击拉伸实验的可靠性,并通过数值分析的方法研究了应力波在杆系中的传播,验证了所设计装置符合一维应力波的假设。同时,与其他国内单位所研制的冲击拉伸装置相比,首先该装置的动力发生器采用了双压气枪并联结构,出气量大,可以完成高强度材料的冲击拉伸实验;其次整个实验装置的连接方便,采用密封圈即可完成高压气枪与转换器之间的气密性问题。且本装置的优势还在于结构简单、安装方便,采用了目前已经技术成熟的气枪装置储存和释放高压气体,从而降低了整个实验装置的造价。

参考文献:

- [1] 唱忠良. 双气室间接杆-杆型冲击拉伸试验装置的研制与试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2007:1—59 (CHANG Zhongliang. The development and testing research of double air room indirect bar-bar impact tensile testing apparatus[D]. Harbin: Harbing Engineering University, 2007:1—59(in Chinese))
- [2] 马晓青 编著. 冲击动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1992:1—4;196—202 (MA Xiaoqing. Shock dynamics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992: 1—20;196—202(in Chinese))
- [3] 李红莲, 贾媛, 卢英 等. 高应变率 SHTB 实验若干问题探讨[C]//第九届全国冲击动力学学术会议论文集(焦作), 2009:225—228 (LI Honglian, JIA Yuan, LU Ying, et al. Some problem research about the high strain rate SHTB experiment[C]//The Ninth National Dynamic Mechanical Meeting Memoir (Jiaozuo), 2009:225—228 (in Chinese))
- [4] 徐伟芳. 冲击拉伸试验技术及其在镁铝合金上的应用[D]. 四川:中国工程物理研究所, 2002:12—30 (XU Weifang. Impact tensile experiment technique and its application on magnesuim-aluminum alloy[D]. Sichuan: China Academy of Engineering Physics, 2002: 12—30(in Chinese))
- [5] 宋吉舟, 夏源明. 弹塑性材料滤波作用的研究——间接杆-杆型冲击拉伸试验装置产生加载脉冲的三维弹塑性动力学有限元分析[J]. 实验力学, 2004, 19(4): 469—476 (SONG Jizhou, XIA Yuanming. A study on the filter function of elastic-plastic material-3D dynamic elastic-plastic FEA for the generation of the incident pulse in the indirect bar-bar tensile impact apparatus[J]. Journal of Experiment Mechanics, 2004, 19(4): 469—476 (in Chinese))
- [6] 李运良, 门朝举, 谭书舜 等. 摆锤式间接杆-杆型 SHTB 装置的研制及 FEM 仿真分析[J]. 工程力学, 2011, 28(5): 245—246 (LI Yuanliang, MEN Chaoju, TAN Shushun, et al. Develop and simulation analysis by FEM of the pendulum impact tensile test apparatus of bar-bar[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(5): 245—246 (in Chinese))
- [7] 蔡猛, 朱勤, 余光伟 等. 气枪式杆杆型冲击拉伸实验装置的设计与试验研究[J]. 机械设计与研究, 2001, 17(3): 68—69 (CAI Meng, ZHU Qin, YU Guangwei, et al. The design and test research of gas gun bar-bar impact

- tensile apparatus[J]. Machine Design and Research, 2001, 17(3): 68—69(in Chinese))
- [8] 李俊玲, 陈荣, 林玉亮 等. 压拉通用霍普金森杆装置[P]. 中国:101666724,2010 (LI Junling, CHEN Rong, LIN Yuliang, et al. Hopkinson tensile and press general bar apparatus[P]. China: 101666724,2010 (in Chinese))
- [9] 杨鹏飞, 汪洋, 夏源明. 基于 Hopkinson 杆的材料高应变率拉伸实验技术[J]. 实验力学, 2011, 26(6):674—679 (YANG Pengfei, WANG Yang, XIA Yuanming. Experimental technique of high strain-rate tension based on Hopkinson bar [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(6):674—679(in Chinese))

The Development and Testing Research of Impact Tensile Testing Apparatus

ZOU Guang-ping¹, CHANG Zhong-liang¹, WANG Dan¹, DONG Dan-dan², WANG Xin-zheng³

(1. College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

3. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 150001,China)

Abstract: Since the technology applied in material dynamic experiment is more complicated than that in quasi-static mechanical experiment, so, in order to meet the demands of simulating the process of impact loading at different speeds, the design of experimental device becomes one of the key problems. Especially for the tests of material dynamic tensile properties, there is no uniform standard for impact tensile device. This paper presents a set of double air chamber indirect bar-bar impact tensile testing apparatus designed based on one-dimensional elastic stress wave principle. The device adopts a symmetrical arrangement of double air chamber, at the same time, its gas route conversion is realized by a gas converter, which overcome the shortcomings of complex structure, strict sealing demanding existed in current pneumatic impact tensile equipment. The impact tensile properties of 2A12T4 aluminum specimen were tested by this apparatus, and numerical simulation was used for analyzing the stress wave propagation effect in bar system and specimen. The demonstration of design reasonability and experiment reliability of this impact tensile test device is achieved by experimental measurement and numerical analysis.

Keywords: impact tensile; split Hopkinson tensile bar; one-dimensional stress wave; double air chamber; numerical simulation