

文章编号:1001-4888(2013)05-0557-06

基于多级电磁发射的 mini-SHPB 装置^{*}

刘战伟¹, 吕新涛¹, 陈喜民¹, 谢惠民²

(1. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081; 2. 清华大学航天航空学院, 北京 100084)

摘要: 由于微小型试件动态力学性能研究的重要性与测试的困难性, 以及高应变速率动态试验研究的需要, 研制了基于磁阻式多级电磁发射的微型霍普金森压杆(mini-SHPB)装置。该装置由新型微型霍普金森压杆系统与磁阻式多级电磁发射系统组成。利用电磁脉冲发射原理, 巧妙地设计了简单易行的磁阻式多级线圈发射系统, 为微型霍普金森压杆系统的撞击杆提供驱动力。文中详细描述了该系统的各部分组成和原理, 整个系统简单紧凑。通过应变速率不敏感材料 2024 铝合金的动态压缩试验验证了该装置的可靠性。

关键词: 电磁驱动技术; 微型分离式 Hopkinson 压杆装置; 动态力学性能; 高应变速率

中图分类号: O347.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-12-187

0 引言

霍普金森压杆(SHPB)技术源于 1914 年 B. Hopkinson 测试压力脉冲的试验工作^[1], 1949 年, H. Kolsky 在此基础上进行了材料单轴动态压缩性能试验, 测试了金属材料在高应变率下的力学性能^[2]。

经过几十年的发展, 此技术已成为测试材料在高应变率下力学行为的重要手段。研究人员对 Hopkinson 压杆的试验方法进行了不断的改善, 同时发展了霍普金森拉杆(SHTB)和扭杆试验技术, 并获得了广泛应用。然而, 传统的 SHPB 和 SHTB 技术大多采用气动作为加载方式, 在加载速度、试验可重复性、低噪声和加载装置小型化等方面表现出了诸多的不足。

电磁发射技术利用电磁力提升和推动物体, 在高速或超高速发射方面具有很好的应用前景。电磁发射原理可以分为导轨式、线圈式和重接式。其中, 磁阻式线圈发射方式属线圈式的一种, 具有结构简单、可控性好、可靠性和抗破坏性高等优点。2008 年, 北京理工大学王一沛首次开展了磁阻式线圈发射技术在 SHTB 装置中的应用研究^[3], 后经过改进, 于 2010 年申请了国家发明专利; 2009 年, C. M. A. Silva 等将磁阻式线圈发射装置应用到大型 SHPB 装置中, 实现了对金属材料的动态力学性能测试^[4]; 2010 年, 西北工业大学郭伟国等开展了磁阻式线圈发射方式在 SHPB 中的应用尝试^[5]。但是以上研究仍然处于电磁发射技术与 Hopkinson 压杆技术相结合的探索阶段, 撞击杆的发射方式局限于单级电磁驱动, 且发射速度有限, 对于一些要求更高应变率的微小型试件动态力学性能研究显得无能为力。

可见, 虽然基于磁阻式线圈发射的霍普金森杆技术具有噪音小、能量转化率高、易于实现小型化等诸多优点, 但是目前该技术仍处于起步阶段。本文在前人工作的基础上改进了磁阻式线圈发射技术, 实现了多级电磁发射形式, 显著提高撞击杆的发射速度, 进而可以提高实验的加载应变率。同时, 搭建了适用于高应变率下微小型试件动态力学性能研究的微型霍普金森压杆系统, 并通过应变速率不敏感材料 2024 铝合金的动态力学性能试验, 验证了该装置的可行性。

* 收稿日期: 2012-12-12; 修订日期: 2013-04-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(11232008)、面上项目(11072003)、北京市自然基金面上项目(3122027)

通讯作者: 刘战伟(1973—), 男, 副教授。主要研究领域: 光测实验力学与材料的动态力学性能。E-mail: liuzw@bit.edu.cn

1 多级电磁脉冲驱动原理

根据电磁发射原理^[6-8],磁阻型线圈发射系统由一系列螺线管驱动线圈和铁磁材料弹丸组成,如图1所示。由于在线圈腔内放置铁磁材料能减小磁阻,因此当弹丸位于磁场内时,环绕线圈磁路的磁阻将发生变化,于是对弹丸产生了垂直线圈截面并指向线圈中心的作用力。当弹丸行进到线圈中心时,磁路的空气间隙变小,由于铁磁弹丸的磁导率比空气要高得多,磁通较容易地形成和通过,此时磁路的磁阻最小,因此驱动线圈对弹丸的作用力亦最小。当弹丸继续向前行进而远离线圈中心时,由于磁阻变大,驱动线圈再次对铁磁弹丸产生指向线圈中心的作用力。不过此时的作用力已经由原来的驱动力变成为阻碍弹丸向前行进的阻力,弹丸会出现减速现象。因此,弹丸到达线圈中心后必须立即采取一定的措施使它不受或少受减速阻力作用,以提高子弹发射速度。实际的多级磁阻式电磁发射装置设计,要求具有一系列按时序导通的线圈回路,从而使弹丸在运动过程中持续受到加速力的作用。

利用虚位移原理可求得铁磁材料子弹在螺线管中的受力。如图1所示,一个很长的N匝螺线管,长度为l,通有恒定电流I。设截面积为A,恒定磁导率μ的弹丸沿螺线管的轴线方向插入其中。计算弹丸的受力不需要求出整个系统的磁场能量,而只需要求出弹丸在图1(a)、(b)两种位置时系统磁场能量之差ΔW_m^[9],即

$$\Delta W_m = \frac{1}{2} \int_{A \cdot \Delta x} (\mu - \mu_0) H^2 dV = \frac{1}{2} \chi_m \mu_0 \left(\frac{NI}{l} \right)^2 A \quad (1)$$

式中,χ_m为铁磁物质的磁化率,χ_m= $\frac{\mu}{\mu_0}-1$;μ为绝对磁导率;μ₀为真空磁导率;H为螺线管中的磁场强度;dV=AΔx为螺线管的单位体积。从而得出弹丸所受的加速度:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{\Delta W_m}{\Delta x \cdot m} = \frac{\chi_m \mu_0 H^2 A}{2 Al_p \rho} = \frac{\chi_m \mu_0 H^2}{2 l_p \rho} \quad (2)$$

式中l_p为弹丸长度;ρ为弹丸材料的密度。

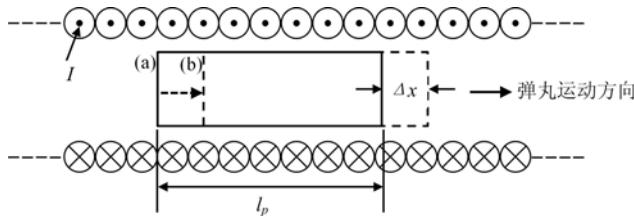


图1 铁磁弹丸受力分析图

Fig. 1 Ferromagnetic projectile force analysis

由于弹丸为导磁材料,不同的截面积A对磁场强度H的影响较小,在忽略其变化的情况下,弹丸所获得的加速度a与弹丸的截面积A无关,只与弹丸材料的密度ρ和长度l_p有关。

但是,以上两个公式给出的只是近似分析的结果。原因之一是推导时没有考虑漏磁(实际上存在不经过弹丸的漏磁);另一个原因是,对这里的非线性问题使用了线性分析方法。作用在弹丸上的实际加速力和式(2)的结果有一定的误差。倘若精确地设计磁阻型线圈发射装置,必须要对影响发射的因素进行全面的考虑和优化。

根据以上分析可以得出在设计多级发射装置时要注意的几个原则:

- (1) 磁阻型线圈发射装置不要求其驱动电源有很大的电流变化率;
- (2) 线圈电流强度一定的情况下,弹丸最终的出口速度只取决于弹丸相对驱动线圈的位置;
- (3) 要想得到最大的出口速度,应使线圈回路中的电流在弹丸加速过程中达到最大值,同时当弹丸中心位置与线圈中心位置重合时使电流为零;
- (4) 在弹丸将要进入下级线圈时,应提前导通下一级线圈回路,以保证弹丸再次加速过程中线圈回路中电流达到最大。

依据以上分析过程和注意原则,本文设计了简单实用的两级发射模型,如图2所示,其中图2(a)为

磁阻式多级电磁发射的结构图;图 2(b)为第一级光电信号控制图。如图 2 所示,弹丸预置于光电开关 G1(图(b)中的 5)的蓝、黑两极之间,蓝、黑两极由于被遮挡而使光电开关 G1 的红、蓝两极产生电压信号并作用于场效应(MOSFET)管的 G 极和 S 极。MOSFET(IRFP360)管属于电压控制型半导体器件,具有电子开关的功能,可实现低电压电路控制高电压电路的导通与断开,即光电开关 G1 的红、蓝两极产生电压信号并作用于 MOSFET 管的 G 极和 S 极,MOSFET 管在电压信号作用下导通 G 极和 D 极。此时闭合触发开关 4,驱动线圈的供电回路导通并驱动弹丸向右运动。在弹丸末端经过光电开关 G1 后,光电开关的电压信号消失,MOSFET 管断开第一级驱动线圈回路,最大程度减小弹丸受到的阻力作用。弹丸在惯性作用下继续运动至光电开关 G2(图(a)中的位置(2))处,光电开关 G2 以同样的原理导通第二级驱动线圈回路,实现对弹丸的持续加速。其中的响应时间在纳秒级范围内,能够几乎无延时地迅速导通线圈回路。第二级发射系统的控制结构与第一级的区别在于用常闭开关代替触发开关,只通过 MOSFET 管控制驱动线圈的导通与断开。由于电容放电时需要一定时间回路才能达到最大电流,适当调整两级线圈间的距离就能获得对弹丸的理想加速效果。此多级电磁发射结构设计简单,控制可靠,容易实现更多级的弹丸加速。为了获得更好的发射效率,本文采用了发射线圈长度与子弹长度为 1 : 1 的模型^[10]。

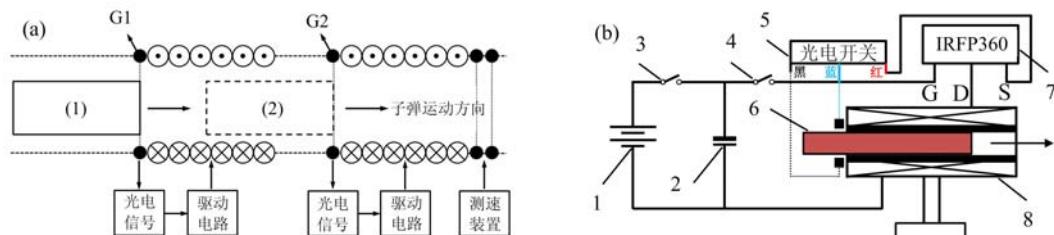


图 2 多级电磁发射技术原理:(a) 多级电磁发射系统的结构;(b) 第一级线圈控制电路

1 高压电源;2 储能电容组;3 充电开关;4 触发开关;5 光电开关;6 圆柱形弹丸;

7 MOSFET 管(IRFP360);8 驱动线圈

Fig. 2 The principle of multi-stage electromagnetic driving technique:

(a) Structure of multi-stage electromagnetic driving technique; (b) The control circuit of first coil

1 High voltage power supply; 2 Storage capacitance bank; 3 Charge switch; 4 Trigger switch;

5 Photo sensor; 6 Cylindrical projectile; 7 IRFP360; 8 Driving coil

2 Mini-SHPB 系统原理

传统霍普金森压杆^[11,12]是将试样放置在入射杆和透射杆之间,撞击杆(子弹)以一定的速度同轴撞击入射杆的自由端面,在入射杆中产生应力脉冲,并沿着入射杆向试样传播。当入射应力脉冲传播到入射杆与试样的界面时,一部分返回入射杆,另一部分传入试样并对试样进行加载,最后通过试样与透射杆的界面传入透射杆。如此,通过粘贴在入射杆与透射杆上的应变片可得到三个应力脉冲信号,分别为入射波 $\epsilon_i(t)$ 、反射波 $\epsilon_r(t)$ 和透射波 $\epsilon_t(t)$ 。再由一维应力波理论确定试样上的应变率、应变及应力:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_s(t) &= \frac{c_0}{l_0} [\epsilon_i(t) - \epsilon_r(t) - \epsilon_t(t)] \\ \epsilon_s(t) &= \frac{c_0}{l_0} \left[\int_0^t [\epsilon_i(\tau) - \epsilon_r(\tau) - \epsilon_t(\tau)] d\tau \right] \\ \sigma_s(t) &= \frac{A_b E_b}{2 A_0} [\epsilon_i(t) - \epsilon_r(t) - \epsilon_t(t)]\end{aligned}\quad (4)$$

式中 E_b 、 c_0 、 A_b 为压杆的弹性模量、波速及横截面积; A_0 和 l_0 为试样的横截面积及长度。假设试样在塑性变形过程中两端所受的力处于准静态平衡状态,则有:

$$\dot{\epsilon}_s(t) = \frac{-2 c_0}{l_0} \epsilon_r(t) \quad (5)$$

由式(5)可知,入射杆的材料一定时,应力波速一定,要提高试样的加载应变率,一方面可以提高入

射脉冲的幅值,另一方面可以减少试样的长度。基于上述原理,在多级电磁发射技术提高入射脉冲幅值的同时,将传统的霍普金森压杆装置按一定的比例缩小,将大幅地提高试样的加载应变率。因此在磁阻式线圈发射的基础上,结合微型霍普金森杆技术,实验室自行研制了直径为4mm的微型霍普金森压杆装置,如图3所示。微型霍普金森压杆装置主要由多级电磁发射系统与微型杆件系统组成,其中撞击杆、入射杆、透射杆的直径均为4mm,撞击杆的长度为150mm,入射杆、透射杆的长度经过严格验证选为350mm,此长度足以将入射波与反射波完全分开。整个装置的长度仅为1.3m,可进行试验的试样直径一般为1~3mm。

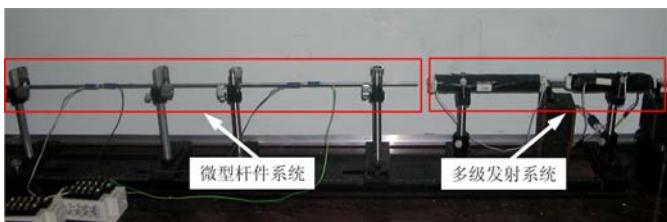


图3 微型霍普金森压杆装置

Fig. 3 Mini-SHPB device

利用多级电磁发射技术研制的微型霍普金森压杆装置不仅可以使撞击杆的发射速度达到20m/s,试样的加载应变率轻松超过 10^4s^{-1} 量级,而且由于杆件的直径很小,可以有效减小试验过程中的横向惯性效应及弥散效应^[11]。此外,由于多级电磁发射 mini-SHPB 装置中撞击杆的发射速度只与

储能电容组中的电荷量有关,即只与储能电容组的电压有关,因此只要每次试验时对储能电容组的电压值进行简单的设定,就可轻易实现相同应变率下的重复性冲击试验。试验中储能电容组的充电过程仅需几分钟,非常利于反复试验。

3 实验装置验证

如图3所示的微型霍普金森压杆装置,在没有试样的加载条件下得到如图4所示的应力脉冲波形,其中由于撞击杆的长度为150mm,应力波的脉冲宽度为撞击杆的两倍300mm,杆中应力波的传播速度为5170m/s。由图4可知,得到的入射波与反射波的波形基本一致,符合应力波的传播规律,即应力波在两根材料相同的弹性杆中传播时,应力波将无反射地通过撞击接触面,且没有波形叠加的现象。同时可以看出,应力脉冲信号并未受到电磁干扰信号的影响,这是因为在弹性杆中传播时,电磁干扰信号传播速度要快于应力脉冲信号^[5]。

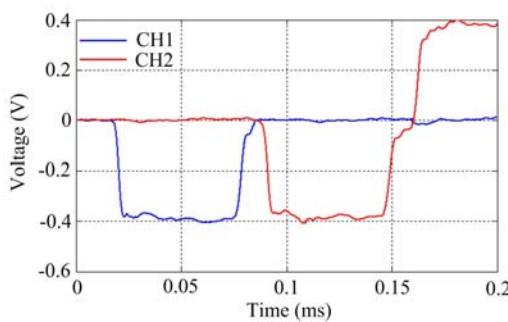


图4 Mini-SHPB 装置空载的典型波形

Fig. 4 The typical waves of mini-SHPB without specimen

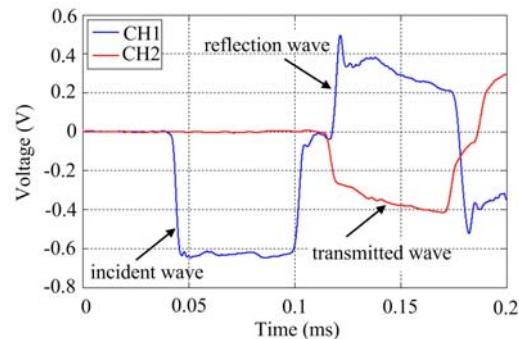


图5 2024 铝合金典型应力波形

Fig. 5 The typical waves of mini-SHPB with 2024 aluminum alloy specimen

为进一步验证微型霍普金森压杆装置的可行性,需要对装置进行有试样的冲击压缩验证试验。目前对于霍普金森杆装置的验证工作主要是通过应变率无关材料的动态试验进行的。众所周知,2024铝合金材料是应变率无关材料的典型代表,这种材料已经得到了详细的研究^[13]。本文也利用这种材料的冲击压缩试验结果,来对微型霍普金森压杆装置进行可靠性验证。其中试样的直径为2mm,厚度为2mm,试验得到的典型应力波形曲线如图5所示。

根据一维应力波理论可得出2024铝合金在不同应变率下的应变率—时间曲线、应变—时间曲线、

应力—时间曲线及应力—应变曲线,如图 6~9 所示。

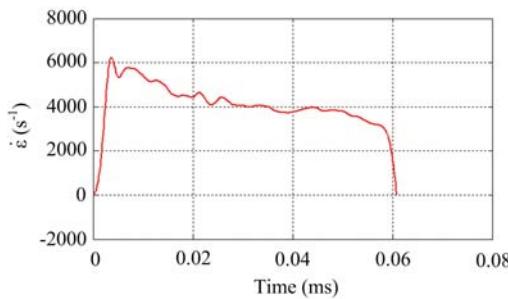


图 6 2024 铝合金应变率—时间曲线

Fig. 6 True strain rate-time curve of 2024 aluminum alloy specimen

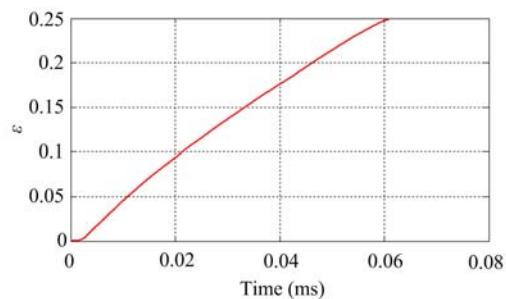


图 7 2024 铝合金应变—时间曲线

Fig. 7 True strain-time curve of 2024 aluminum alloy specimen

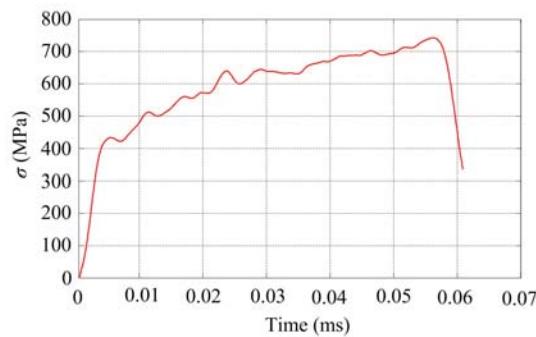


图 8 2024 铝合金应力—时间曲线

Fig. 8 True stress-time curve of 2024 aluminum alloy specimen

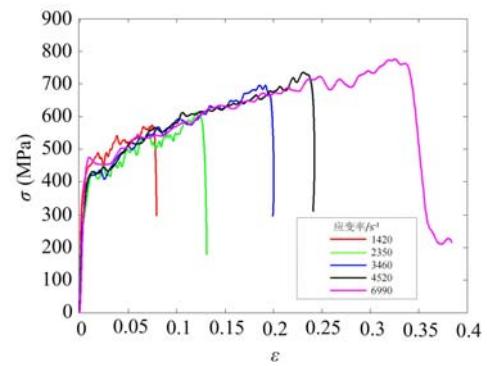


图 9 2024 铝合金在不同应变率下的应力—应变曲线

Fig. 9 True stress-strain curves of 2024 aluminum alloy specimen under different strain rate

试验分析:从试验得到的图形可以看出,不同应变率下 2024 铝合金的最大应变随着加载应变率的增加而增大。各个应变率的材料屈服强度都约等于 400MPa,且曲线在弹性阶段及屈服后都具有良好的一致性。由 2024 铝合金的应变率无关效应可以证明,压缩冲击试验得出的结果符合 2024 铝合金的动力学性能,因此说明了本文设计的微型霍普金森压杆装置是可靠的。

4 结论

本文基于磁阻式多级电磁发射原理与微型霍普金森杆技术研制了电磁驱动的微型霍普金森压杆装置,其结构合理紧凑,驱动系统电路设计简单可靠,易于实现。且装置整体尺寸小,可直接放置在桌面上进行试验,加载应变率高,适用于微小型试件及高应变率的动态性能试验研究。为了验证试验装置的可靠性,对应变率无关材料 2024 铝合金进行了压缩动态力学性能测试。得出的结果表明,2024 铝合金材料在不同的应变率下各应力—应变曲线具有良好的一致性,说明了微型霍普金森压杆装置的可靠性。

参考文献:

- [1] Hopkinson B. A method of measuring the pressure in the deformation of high explosives by the impact of bullets [J]. Philos Trans R Soc A, 1914, 213:437—452.
- [2] Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading [J]. Proceedings of the Physical Society of London B, 1949, 62:679—700.
- [3] 王一沛. 小型冲击加载装置的设计与应用[D]. 北京:北京理工大学, 2008 (Wang Yipei. Design and application of miniature impact loading device [D]. Beijing: Beijing institute of technology, 2008 (in Chinese))

- [4] Silva C M A, Rosa P A R, Martins P A F. An innovative electromagnetic compressive split Hopkinson bar[J]. Int J Mech Mater Des, 2009, 5:281—288.
- [5] 郭伟国, 赵融, 魏腾飞, 姚爽. 用于 Hopkinson 压杆装置的电磁驱动技术[J]. 实验力学, 2010, 26(6):682—689 (Guo Weiguo, Zhao Rong, Wei Tengfei, Yao Shuang. Electromagnetic driving technique applied to split-Hopkinson pressure device [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 26(6):682—689(in Chinese))
- [6] 刘延贤. 发展中的电磁炮[J]. 大学物理, 1998, 17(4):44—46 (Liu Yanxian. The developing electromagnetic gun [J]. College Physics, 1998, 17(4): 44—46 (in Chinese))
- [7] 王德满, 王跃进, 谢慧才. 线圈炮—电磁同轴发射器及其系统分析[J]. 宇航学报, 1996, 17(4):79—82 (Wang Deman, Wang Yuejin, Xie Huicai. Colgun-Electromagnetic coaxial launcher and its systems analysis [J]. Journal of Astronautics, 1996, 17(4):79—82 (in Chinese))
- [8] 龚兴根, 孙承纬, 周之奎等. 原理性电磁轨道炮的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1987, 7(2):164—168 (Gong Xinggen, Sun Chengwei, Zhou Zhikui, et al. Experimental studies on the test electromagnetic railgun [J]. Explosion and Shock Waves, 1987, 7(2):164—168 (in Chinese))
- [9] 王莹, 肖峰. 电炮原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995 (Wang Ying, Xiao Feng. Electric gun principle [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995 (in Chinese))
- [10] 姜红军, 高俊山, 邱瑞生. 电磁发射装置的结构优化及抛体受力分析[J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(1):59—65 (Jiang Hongjun, Gao Junshan, Qiu Ruisheng. The improvement of electromagnetic launcher and the force analysis [J]. Techniques of Automation and Application, 2004, 23(1):59—65 (in Chinese))
- [11] 王礼立, 朱兆祥. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005 (Wang Lili, Zhu Zhaoxiang. Foundation of Stress Waves [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005 (in Chinese))
- [12] 郭伟国, 李玉龙, 索涛, 刘元墉. 应力波基础简明教程[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007 (Guo Weiguo, Li Yulong, Suo Tao, Liu Yuanrong. The tutorial of stress wave [M]. Xi'an: Northwestern Ploytechnical University Press, 2007 (in Chinese))
- [13] Xiao D W, Li Y L, Hu S S. Study of small dimension specimen on SHPB test [J]. Shock Compression of Condensed Matter, 2007, 995:1151—1154.

On the Mini-SHPB Device Based on Multi-Level Electromagnetic Emissions

LIU Zhan-wei¹, LV Xin-tao¹, CHEN Xi-min¹, XIE Hui-min²

(1. Dept. of Mechanics, School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. FML, Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Taking into account of the importance and testing difficulty for dynamic mechanical property of miniature specimen and from the needs of material dynamic test at high strain rate, a miniature split-Hopkinson pressure bar (Mini-SHPB) device was self-developed based on multi-level electromagnetic emission technique. It consists of a miniature SHPB system and a multi-level electromagnetic emission system. According to the electromagnetic pulse emission principle, a magnetoresistive multi-layer coil emission system was designed, which provides driving for strike bar of miniature SHPB system. Composition and principle of two systems are described in detail in this paper. Self-developed Mini-SHPB device has a compact structure. Impact compression test for 2024 aluminum alloy (strain rate insensitive material) was performed to verify the reliability of Mini-SHPB device.

Keywords: electromagnetic driving technique; mini-split hopkinson pressure bar (SHPB) device; dynamic mechanical properties; high strain rate