

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0195

基于电磁感应原理的冲击试验技术*

陈旭¹, 李子祺¹, 吴亚东², 王靖博¹, 李玉龙^{1,3,4}, 郭亚洲^{1,3}

(1. 西北工业大学航空学院, 陕西 西安 710072;

2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;

3. 陕西省冲击动力学及工程应用重点实验室, 陕西 西安 710072;

4. 西北工业大学民航学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 基于电磁感应的基本原理, 提出了一种由电磁力驱动产生高幅值长脉宽加速度载荷的冲击试验装置, 弥补了现阶段地面冲击试验技术的缺陷。使用电磁 Hopkinson 杆进行了加速度冲击试验, 得到了应力和加速度载荷。根据一维应力波原理, 推导出细长杆中加速度与应力之间的关系式, 计算结果表明试验值和理论值吻合较好, 验证了试验方法的准确性。使用 COMSOL 有限元软件对电磁 Hopkinson 杆加速度冲击试验进行了数值模拟, 模拟结果与试验结果一致性较好, 验证了数值模型和方法的准确性。基于此有限元模型, 提出了产生高幅值长脉宽加速度载荷的冲击试验装置, 并对该装置进行了不同电压和电容下的数值模拟。结果表明, 提出的试验装置能够产生长脉宽高幅值的加速度过载环境, 且电容电压越大则加速度幅值越大, 电容值越大加速度脉宽越宽。通过调控装置中的电路参数, 可产生不同幅值和脉宽的加速度载荷。

关键词: 电磁感应; 电磁 Hopkinson 杆; 高幅值长脉宽; 冲击试验

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Impact testing technique based on the principle of electromagnetic induction

CHEN Xu¹, LI Ziqi¹, WU Yadong², WANG Jingbo¹, LI Yulong^{1,3,4}, GUO Yazhou^{1,3}

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

2. Beijing Institute of Aerospace System Engineering, Beijing 100076, China;

3. Shaanxi Impact Dynamics and Engineering Application Laboratory, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

4. School of Civil Aviation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the basic principles of electromagnetic induction, an impact device is proposed that generates high-amplitude and long-pulse acceleration loads driven by electromagnetic forces. The impact device goes to make up for the shortcomings of the current stage of ground impact test technology. The disadvantages of the current stage of ground impact test technology include mainly time-consuming, high cost, low repeatability and controllability, and it is difficult to continuously improve the pulse width of acceleration load. Acceleration impact tests were performed using an electromagnetic Hopkinson bar, and the working process of the device from the generation of electromagnetic force to its transformation into impact load was analyzed. In the acceleration impact test, the stress on the bar was obtained by strain gauges and the acceleration loads at the end of the bar were obtained by acceleration transducers. A plurality of test results without loss of repeatability. The classical one-dimensional stress wave theory for predicting the relationship between acceleration and stress in slender bars is developed. Comparative analysis against experimental data are presented to demonstrate the effectiveness of the present approach. The electromagnetic Hopkinson bar acceleration impact test was numerically simulated using COMSOL

* 收稿日期: 2023-05-25; 修回日期: 2024-03-03

第一作者: 陈旭(1997—), 男, 硕士研究生, iamcxchenxu@163.com

通信作者: 郭亚洲(1981—), 男, 博士, 教授, guoyazhou@nwpu.edu.cn

finite element software, and the simulation results showed good consistency with the experimental results, indicating that the numerical model could simulate this kind of impact test more accurately and verifying the accuracy of the numerical model. Based on this finite element model, an impact device that generates high-amplitude, long-pulse acceleration is proposed, and numerical simulations of the device are carried out at different voltages and capacitances. The simulation results show that the device is able to generate the required acceleration. The acceleration amplitude increases with increasing capacitance voltage and the acceleration pulse width increases with increasing capacitance value. By regulating the values of the circuit parameters, the device can generate acceleration loads with different amplitudes and pulse widths.

Keywords: Electromagnetic induction; Electromagnetic Hopkinson bar; High-amplitude, long-pulse; Impact test

航天器以及导弹中的精密仪器和电子器件在使用过程中会受到一种长脉宽高幅值的加速度冲击载荷,这种载荷有时会对这些电子元器件造成不同程度的损伤或失效^[1-5]。因此在这些产品交付使用前需要进行这类加速度冲击载荷的试验测试,以保证这些精密元器件在受到高加速度过载的情况下仍能保持正常工作。

由于实际高 g 值冲击环境下的测量过程和代价复杂而高昂,需要通过地面模拟试验对航天器和武器装备进行考核验证,研究发展一种能够产生高幅值长脉宽的加速度过载,且整体体积小、占地面积少、加工制造成本低、使用安全方便的高 g 值冲击测量试验系统,达到与实际环境下量级相近的过载幅值和持续时间,并提高过载曲线的重复性和可控性是十分有必要的。目前,产生高 g 值的地面试验技术大都采用马歇特锤击试验^[6-7]、落球碰撞试验^[8]、空气击锤试验^[9-10]、空气炮试验^[11]、Hopkinson 杆试验^[12-13]等手段模拟实际的高 g 值过载曲线,但这些方法存在试验方法可控性差,试验结果重复性差、难以同时兼顾长脉宽和高幅值两种需求等缺陷。

2018 年 Nie 等^[14]用电磁铆接装置代替传统的 Hopkinson 杆系统里的气炮和子弹,并对电磁铆接装置进行改进设计,设计出一种适合材料动态加载试验的应力波发生器;将电磁应力波发生器和 Hopkinson 杆试验系统其他部分结合,建立了新型的电磁 Hopkinson 杆。该电磁 Hopkinson 杆试验系统,在整个应力波的发生和传播过程中并无任何部件的宏观机械运动,因此应力波的起始产生时间可控制在微秒的精度,解决了动态变形原位观察、双轴加载甚至复合加载中的波形同步性问题。Guo 等^[15]对该电磁 Hopkinson 杆试验系统进一步改进和规范,并将其应用于材料的多轴动态试验中。王维斌等^[16]对电磁 Hopkinson 杆试验技术研究发展进行了详细系统的研究综述,涵盖了单轴单向/双向及动态双轴对称压缩/拉伸、复合材料的层间断裂、金属动态包辛格效应等领域的应用现状。

因此本文基于电磁 Hopkinson 杆的电磁感应原理,建立有限元模型,并对模型进行试验验证;基于电磁 Hopkinson 杆的有限元模型提出一种具有高重复性和可控性过载曲线,并能够产生长脉宽高幅值加速度过载环境的冲击试验装置。

1 电磁 Hopkinson 杆加速度冲击试验

1.1 电磁 Hopkinson 杆基本原理

本文采用电磁 Hopkinson 杆技术基本工作原理如图 1 所示。闭合放电开关后,电容器组对主动线圈瞬间放电,在主动线圈中产生强大的脉冲电流,同时形成高强度的脉冲磁场。次级线圈与主动线圈相互贴紧,发生电磁感应现象而产生极强的涡流,次级线圈中的涡流与主动线圈产生的磁场相互作用,次级线圈靠近主动线圈的端面上的质点会受到洛伦兹力作用,在次级线圈中形成磁场力。磁场力在次级线圈内表现为应力脉冲,应力脉冲传入到与次级线圈紧密贴合的波导杆后,以弹性波形式在波导杆中传播,对试样进行加载。

电磁 Hopkinson 杆可以将电磁能量直接转化成入射波,没有明显的宏观位移,单个 LC 电路放电所产生的应力波是半正弦脉冲,通过多个 LC 电路的时序放电,可以精确控制应力脉冲的产生时间和波形,产生不同形状的应力脉冲。

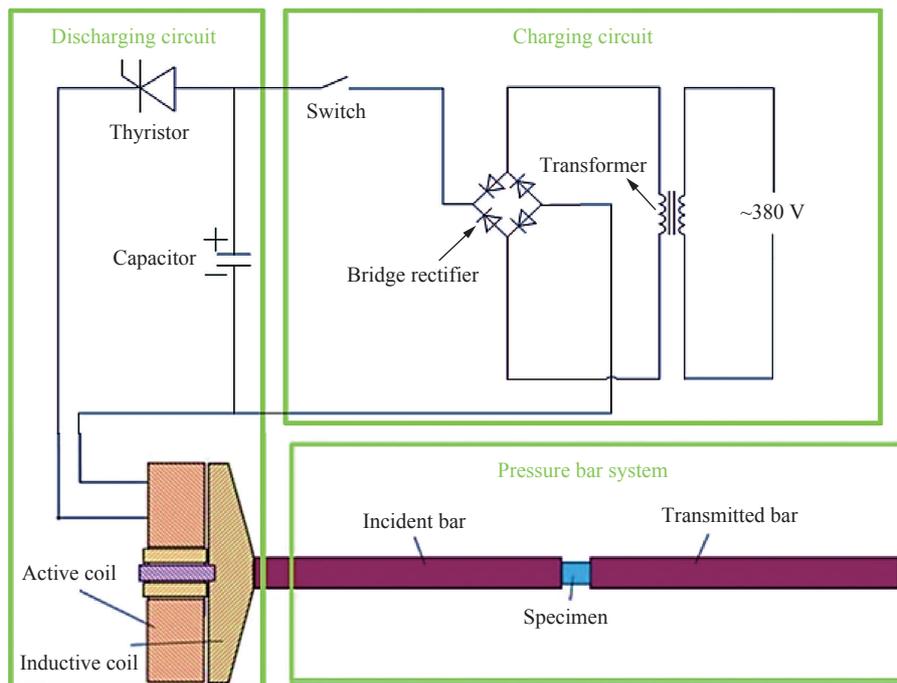


图 1 电磁驱动系统基本工作原理图^[14]

Fig. 1 Schematic Diagram of electromagnetic system^[14]

电容器组的放电电路可简化等效为一个如图 2 所示的 RLC 电路, 图中: C 为电容器的电容值; S 为开关; R 为电路中的等效电阻; L 为电路中的等效电感, u_C 和 u_L 分别表示电容的电压值和电感的电压值。电路中的电流 $i(t)$ 满足电路方程:

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt = u_C \quad (1)$$

当放电电路的电阻较小, 且满足 $R^2 \ll 4L/C$ 时, 放电电路中的电流:

$$i(t) = I_m e^{-\delta t} \sin \omega t \quad (2)$$

式中: I_m 为电流峰值; $\delta = R/2L$ 为衰减系数; $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ 为谐振圆频率; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ 为衰减谐振圆频率。

应力波发生器包含图 3(a) 中的主动线圈和用于产生驱动力的次级线圈。次级线圈和主动线圈同轴安装并且互相贴近。将次级线圈简化成一个靠近主动线圈的薄铜片。主动线圈与次级线圈的结构关系如图 3(a) 所示, 在分析电磁感应作用时, 将 n 匝放电线圈简化为单匝线圈, 简化后通过主动线圈的电流为原来电流的 n 倍, 即:

$$i_1(t) = nI_m e^{-\delta t} \sin \omega t \quad (3)$$

冲击试验装置中次级线圈为铜制圆盘式结构, 可将次级线圈中产生的涡流等效为单匝电流环, 放电线圈与次级线圈的简化模型如图 3(b) 所示, 图中 d 表示主动线圈和次级线圈之间的距离, r_1 和 r_2 分别表示主动线圈和次级线圈的半径, $i_1(t)$ 和 $i_2(t)$ 分别表示主动线圈的放电电流和次级线圈感应电流。

由式 (3) 可推导出次级线圈中感应出的涡流 $i_2(t)$:

$$i_2(t) = AnI_m e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

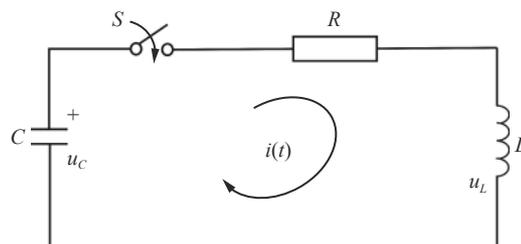


图 2 等效 RLC 电路

Fig. 2 Equivalent RLC circuit

其中:

$$A = \frac{\omega M}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}} \quad (5)$$

$$\varphi = \arctan(R_2/\omega L_2) \quad (6)$$

式中: M 为放电线圈与次级线圈之间的互感, R_2 为次级线圈电阻, L_2 为次级线圈的电感。

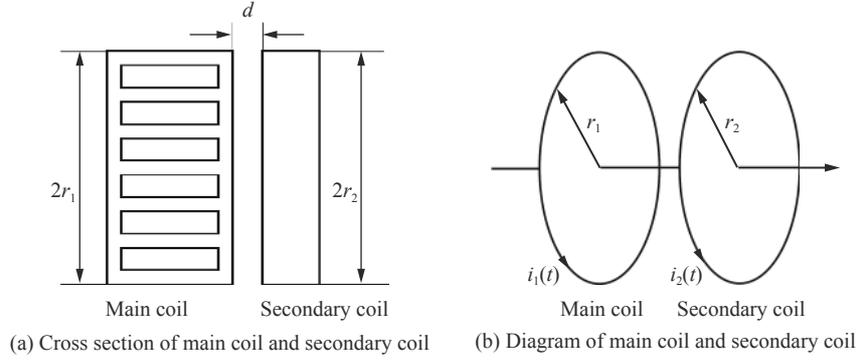


图 3 放电线圈与次级线圈结构图^[16]

Fig. 3 Structure of main coil and secondary coil^[16]

电磁加载系统中主动线圈与次级线圈属于共轴线圈, 其放电线圈与次级线圈之间的斥力 F 与放电电流 $i_1(t)$ 的关系可表示为^[17]:

$$F = \frac{r_1 \mu_0 \omega M n^2}{a \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} i_1^2(t) \quad (7)$$

因此, 与次级线圈接触的波导杆中应力:

$$\sigma(t) = \frac{F}{S} = \frac{r_1 \mu_0 \omega M n^2}{\pi r_b^2 d \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} i_1^2(t) \quad (8)$$

式中: r_b 为波导杆半径, μ_0 为真空磁导率, ω 为放电电路振荡频率, M 为主动线圈与次级线圈的互感, n 为放电线圈匝数, S 为次级线圈面积。

图 4 为试验装置电磁力产生部分的受力分析图。在放电过程中, 主动线圈中的脉冲放电电流在它周围产生变化的磁场, 根据麦克斯韦电磁场理论, 在次级线圈靠近主动线圈的表面, 感应出的涡流使次级线圈底端的材料质点受到磁场的洛伦兹力作用。记 q 和 \mathbf{v} 分别为次级线圈中质点所带的电荷以及电荷的速度矢量, 主动线圈所产生的磁感应强度矢量为 \mathbf{B} , 在次级线圈表面处的方向基本上沿其径向分布。则质点所受到的洛伦兹力为:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (9)$$

由矢量计算法则可知, 洛伦兹力 \mathbf{F} 的方向主要垂直于次级线圈的横截面, 这与传统 Hopkinson 杆的主要受力方向一致。

电容器组放电的瞬间, 次级线圈底端的材料质点会受到洛伦兹磁场力作用, 产生质点的初始扰动, 质点的扰动会以应力波的形式在次级线圈内传播, 即初始的应力波。这个质点的初始扰动是通过场力施加的, 因此不需要瞬间的碰撞或接触, 当磁场产生的瞬间, 应力波也随之产生。

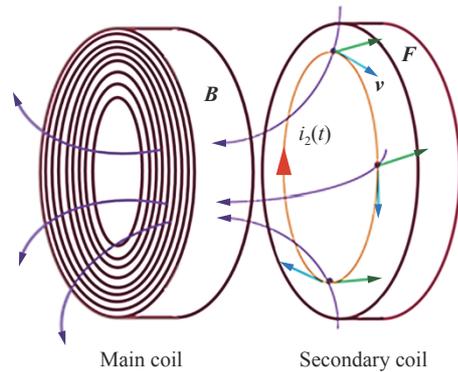


图 4 次级线圈受力示意图

Fig. 4 Force diagram of secondary coil

同传统的撞击产生应力波的驱动方式相比,这种应力波的电磁驱动产生方式的主要区别在于产生材料质点初始扰动的力不同,在电磁驱动产生方式中,感应线圈所受到的洛伦兹力是一个体积力,通过非接触的方式就可以产生,它与磁场同时产生,同时消失,因此可以通过电路来精确控制应力波的产生时间。

加速度由牛顿第二定律导出。然而,如此推导出的加速度为物体质心的平均加速度。而在细长杆中,加速度在各个截面上的差异较大,因此由此推导的加速度并不能代表实际各截面的加速度情况。本文所用的波导杆为一细长杆,根据 Hopkinson 杆原理,在细长杆自由边界处,质点速度

$$v = v_1 + v_R = -2c\varepsilon_1 \quad (10)$$

则细长杆自由界面的质点速度为

$$v(t) = 2c\varepsilon(t) \quad (11)$$

界面质点加速度为

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = 2c \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = 2c \frac{d\sigma(t)}{Edt} \quad (12)$$

式中: t 为时间, v 为边界处的质点速度, v_1 为入射波产生的质点速度, v_R 为反射波产生的质点速度, c_0 为弹性波波速, E 为杆的弹性模量, $\varepsilon(t)$ 为应变, ε_1 为入射波的应变, $\sigma(t)$ 为应力, $v(t)$ 为质点速度, $a(t)$ 为质点加速度。

1.2 电磁 Hopkinson 杆试验装置

试验装置采用的电磁 Hopkinson 杆系统^[15-16],如图 5 所示。试验装置电路部分使用高功率变压器和整流电路,将工业交流电压转换为高压直流电压,为电容充电。电容采用多组定制大容量电容组成的电容器组,通过电容器之间的串联和并联,可以得到不同的电容值。通过控制柜对电容器的充电电压以及充放电过程进行控制。泄流电阻是电路的保护装置,可以将电容器组储存的能量安全卸载。当电容器组充电完成后,通过向放电开关发送触发信号,电容器组储存的电能通过所连接的主动线圈进行释放。放电开关为晶闸管,起单向导通作用,可以将反向放电电流截断,避免反向电流引起的二次加载。

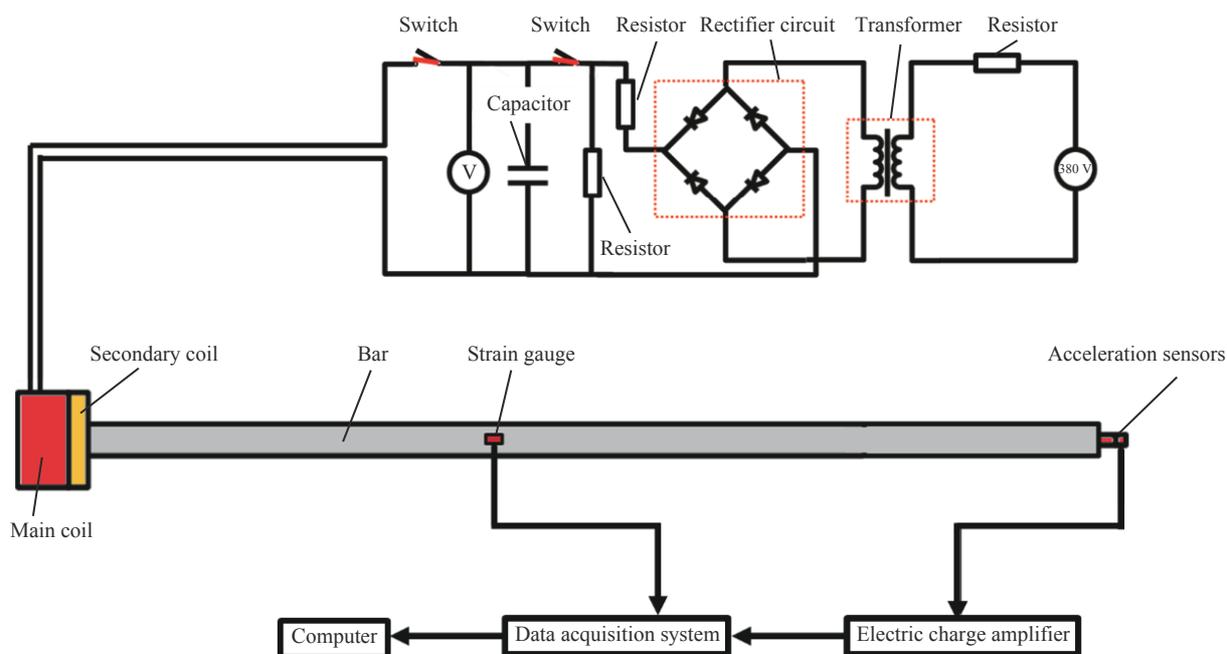


图 5 电磁 Hopkinson 杆加速度冲击装置图

Fig. 5 Diagram of electromagnetic Hopkinson bar system

主动线圈是由宽 15 mm、厚 2 mm 的铜带绕制 16 匝形成的平板线圈, 线圈外径为 90 mm, 内径为 28 mm。次级线圈是采用无氧铜材料制作的厚 8 mm、直径 90 mm 的铜片。波导杆直径 25 mm、长 3 m, 材料为 TC4 钛合金, 一端有深 30 mm 的英制 1/8 螺纹孔。

电磁驱动系统工作时, 充电开关闭合, 交流电源经升压变压器变压后, 再经过整流电路整流, 对电容器组充电, 将能量储存起来。充电电压达到设定电压后, 充电开关断开。放电时, 闭合放电开关, 电容器组对主动线圈瞬间放电, 在主动线圈中产生强大的脉冲电流, 同时形成高强度的脉冲磁场。次级线圈与主动线圈相互贴紧, 发生电磁感应现象, 主动线圈产生的脉冲磁场会引起次级线圈中产生涡流, 次级线圈中的涡流与主动线圈产生的脉冲磁场相互作用, 形成电磁力。电磁力在次级线圈内反复地反射透射, 最终在靠近入射杆端形成应力脉冲, 应力波在波导杆中传播, 通过粘贴在波导杆上的应变片测量作用于杆的载荷随时间的变化规律。同时利用安装在波导杆末端的加速度传感器来采集和记录加速度信号。

1.3 试验结果分析

图 6 为电容 2 mF, 电压 700 和 1400 V 时的波导杆应力时间曲线。从图 7 中可以看出, 应力的波形类似于半正弦型, 两种电压试验下应力波的重复性很好, 电压 700 V 下三次试验值与平均值之间的相对误差分别约为 9.97%、6.17%、5.96%, 电压 1400 V 下两次试验值与平均值之间的相对误差均约为 8.83%, 误差浮动小于 10%。700 V 时应力最大幅值平均为 35.3 MPa, 脉宽平均约为 430 μ s; 1400 V 时应力最大幅值平均为 98 MPa, 脉宽平均为 440 μ s。

图 7 为电压在 700 和 1400 V 下, 加速度传感器采集到的加速度信号。从图中可以看出, 在电容 2 mF、电压为 700 V 时, 三次试验第一个正向加速度曲线的重复性较好, 加速度平均幅值大约为 2600g, 脉宽平均约为 230 μ s。从加速度曲线的脉宽来看, 加速度曲线的脉宽约为应力曲线脉宽的一半。而在电压为 1400 V 时, 两次加载加速度曲线的上升沿重复度较好, 下降沿重复度较差, 加速度平均幅值为 11000g, 脉宽平均约为 200 μ s。

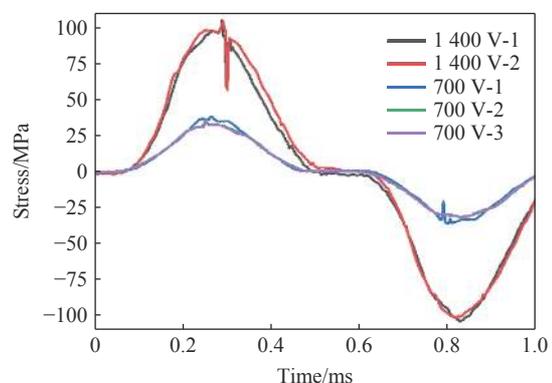


图 6 电压为 700 和 1400 V 应力时间曲线

Fig. 6 Stress-time curve with voltage at 700 and 1400 V

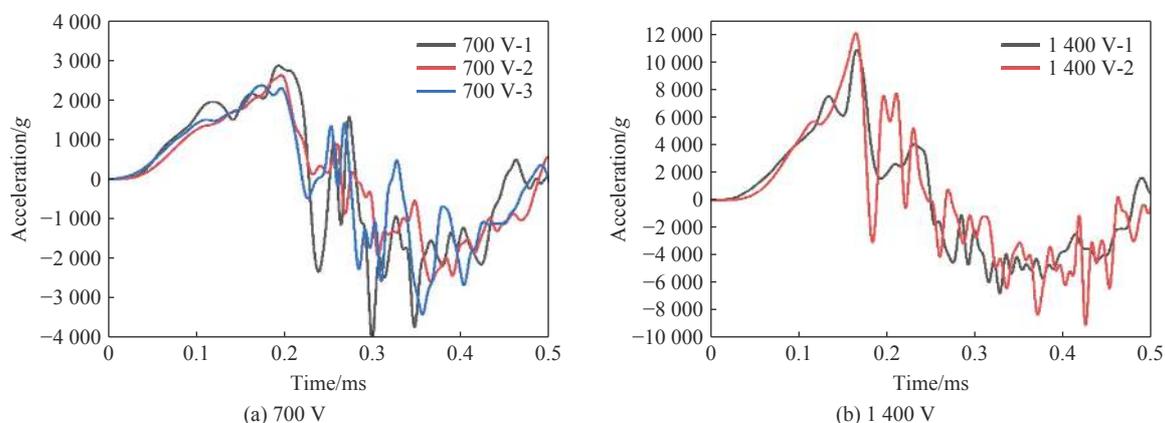


图 7 电压 700 V 和 1400 V 加速度时间曲线

Fig. 7 Acceleration-time curve with voltage at 700 V and 1400 V

从图 7 中可以看出, 加速度曲线有抖动现象, 在高电压下的下降沿阶段和加速度曲线后半段负向加速度阶段的抖动尤为剧烈。如图 8 所示, 在次级线圈和波导杆接触的位置有明显压痕, 导致应力波和加速度曲线出现抖动的现象。同时采用了如图 9 所示的带螺纹的转换接头连接加速度传感器和波导杆。螺纹连接在受到振动, 冲击等动载荷时均会导致其松动。在试验过程中, 由于装置产生高幅值的冲击载荷, 载荷幅值越大, 松动程度越高。载荷脉宽也对螺纹的松动有影响, 载荷脉宽越大, 也会使松动更易发生。当外在载荷导致连接出现松动, 应力波在传播时会被干扰, 导致加速度曲线抖动。为了尽量减少信号抖动, 在试验中通过在螺纹上缠绕生胶带的方式来增强连接强度。另外, 加速度计本身是一种结构, 应力波在内部传播时不可避免的发生反射叠加, 导致信号抖动。



图 8 加载后次级线圈图和转换接头

Fig. 8 Secondary coil and adapter after impact

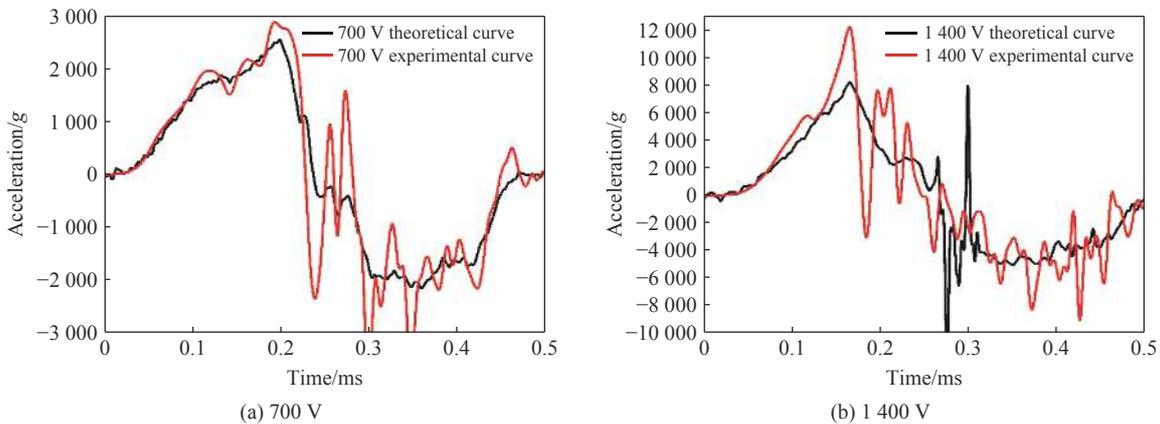


图 9 电压为 700 和 1400 V 理论与试验加速度结果对比

Fig. 9 Comparison of acceleration between theory and test with voltage at 700 and 1400 V

1.4 试验结果与理论结果的对比

将 700V-1 和 1400V-2 对应试验的应力时间曲线代入到式 (12), 得到理论加速度曲线, 并与试验曲线进行对比, 如图 9 所示。可以看出, 电压为 700 V 时理论值与试验值的曲线吻合较好, 证明了试验方法的准确性。

从对比图中可以看出, 理论值的曲线较试验值曲线更加平缓, 抖动明显减小。尤其是在 1400 V 电压下, 理论值与试验值在上升沿阶段的重合度较高, 在达到峰值后, 试验值波形的抖动较为明显, 理论值和试验值加速度曲线的整体趋势是一致的, 且理论值得到的加速度峰值较试验值低。这些现象均是由于加速度传感器与波导杆之间的约束不紧密, 以及加速度传感器在加载过程中出现松动造成的。

2 电磁 Hopkinson 杆的有限元模拟

2.1 模型建立

使用 COMSOL 多物理场有限元软件进行模拟分析。选取磁场、电路和固体力学三个物理场, 采用瞬态求解器进行求解计算。主动线圈、次级线圈采用固定大小的四边形网格, 由于线圈周围的磁场强度最大, 磁感线最密集, 因此对计算精度要求较高, 网格尺寸设置为 1 mm。空气域网格采用自由三角形网

格, 离线圈越远, 网格越稀疏。波导杆采用映射的方法划分网格, 每一网格单元为细长的四边形结构。主动线圈采用固定约束, 限制次级线圈和波导杆径向位移, 仅允许轴向运动。为了减少计算量, 建立了如图 10 所示的电-磁-力耦合的二维轴对称模型。建模时所需的材料参数见表 1。

本文电路采用 RLC 放电电路, 由电阻、电感、电容、二极管以及负载串联构成。设置外电路电阻为 0.01Ω ; 外电路电感为 $9 \mu\text{H}$; 负载代表模型中的主动线圈。各元件通过标号的节点首尾相连, 并添加接地节点, 规定零电势处。

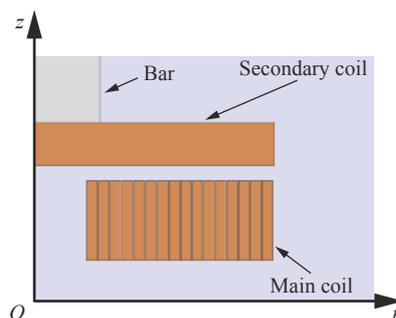


图 10 电磁 Hopkinson 杆有限元模型图

Fig. 10 Finite element model of electromagnetic Hopkinson bar

表 1 各部件材料参数^[18-19]

Table 1 Parameters of each part^[18-19]

部件	材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	相对磁导率	电导率/($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	相对介电常数
主动线圈	紫铜	8960	110	0.35	1	6.0×10^7	1
次级线圈	无氧铜	8940	105	0.33	1	5.8×10^7	1
波导杆	钛合金	4400	110	0.34	1	7.4×10^5	1
空气	—	—	—	—	1	0	1

2.2 试验结果与模拟结果对比

图 11 为电压 700 和 1400 V 时有限元模拟应力与试验应力的结果。可以看出, 模拟结果与试验结果的幅值和脉宽基本一致: 电压为 700 V 时的应力幅值为 36 MPa、脉宽为 430 μs 。电压为 1400 V 时的应力幅值为 97 MPa、脉宽为 420 μs 。

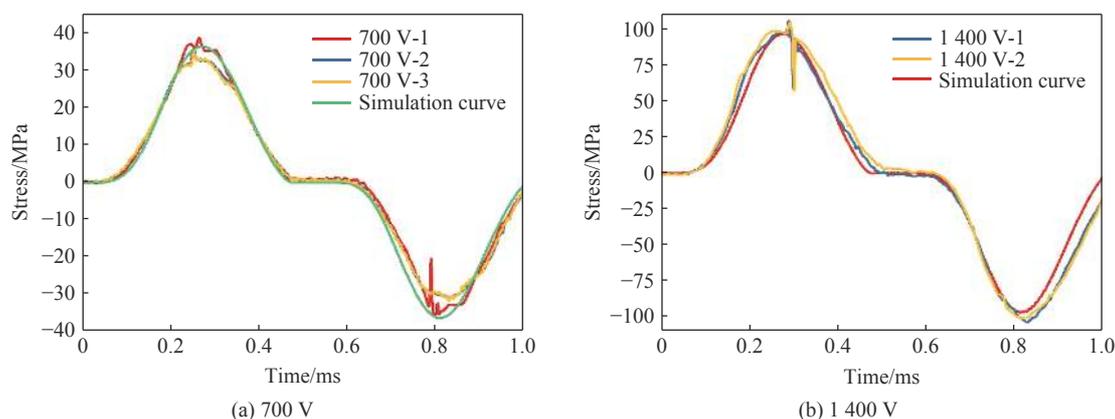


图 11 电压为 700 和 1400 V 模拟和试验应力结果对比

Fig. 11 Comparison of stress between simulation and test with voltage at 700 and 1400 V

图 12 为数值模拟和试验加速度曲线的对比。可以看出, 电压为 700 V 时, 模拟的加速度曲线的幅值与试验值接近, 脉宽稍高于试验值。电压 1400 V 时, 模拟的加速度曲线幅值较低, 脉宽大小接近。

模拟结果的波形平滑, 接近于正弦曲线。这一方面是由于, 数值模拟结果中, 由于模型的收敛性问题, 没有对螺纹进行建模, 也未考虑次级线圈与波导管接触位置的压痕, 因此模拟中不存在实验曲线中的波形振荡问题。另一方面, 加速信号是由应变信号对时间微分得到的, 微小的变化在微分时容易产生

剧烈振荡,因此加速度曲线的振荡可能是由于应变信号采集的微小误差导致的;同时,加速度传感器作为一种结构,应力波在加速度传感器中的传播与在实体中的传播不同,加速度传感器会导致应力波的传播发生变化而引起加速度的振荡。然而,根据一维应力波理论,加速度载荷的产生是由应力波的传播引起的,因此由加速度传感器自身原因引起的加速度载荷振荡并不代表实际的加速度载荷。

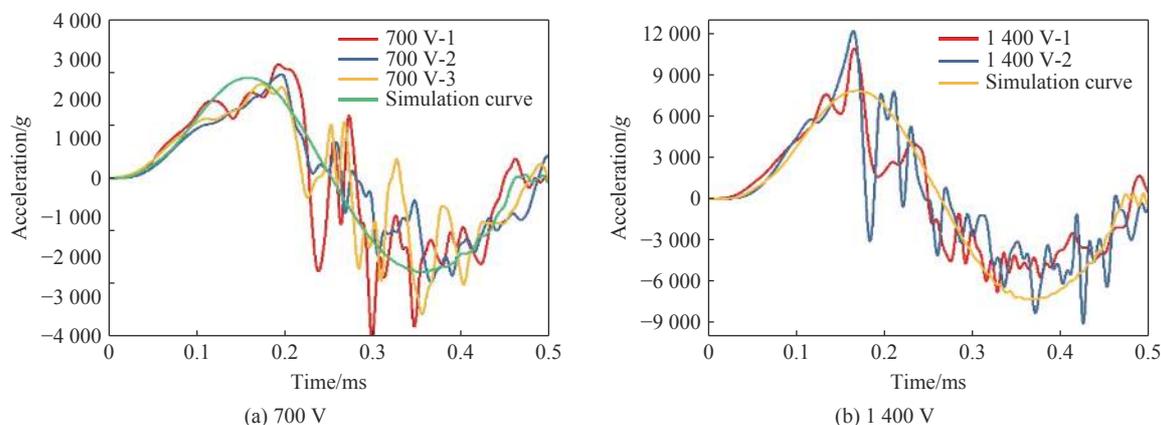


图 12 电压 700 和 1400 V 模拟与试验结果对比

Fig. 12 Comparison of results between simulation and test with voltage at 700 and 1400 V

综合以上分析,提出减少信号振荡的改进措施:(1)改变加速度计与波导杆的连接形式,采用粘接或者焊接方式将加速度计与波导杆相连,保证连接紧密,连接处不发生松动;(2)在次级线圈和波导杆之间安装高强垫片来减少此影响;(3)针对入射波信号进行光滑处理,然后再进行微分,可以使应变片测得的加速度信号光滑;(4)改进加速度传感器结构设计,或者信号处理方法。

从应力波形来看,模拟结果与试验结果基本一致,表明了模拟模型能够对此类问题进行较为精确的模拟,验证了模拟模型和方法的准确性。

3 产生高幅值长脉宽加速度过载环境的冲击试验装置设计方案

通过前文的试验与模拟对比表明,COMSOL 有限元软件建立此类模拟模型具有较好的可靠性,因此基于上一节的有限元模型,提出了一种能够产生高幅值长脉宽加速度过载环境的冲击试验装置,并对此试验装置在不同电压和电容下的加载结果进行了模拟。

3.1 冲击试验装置模型

根据如图 13 所示的冲击试验装置的剖面图建立二维轴对称瞬态数值模型。模型的几何参数和电磁 Hopkinson 杆的参数是有所区别的,建模方法与电磁 Hopkinson 杆模拟中一致。

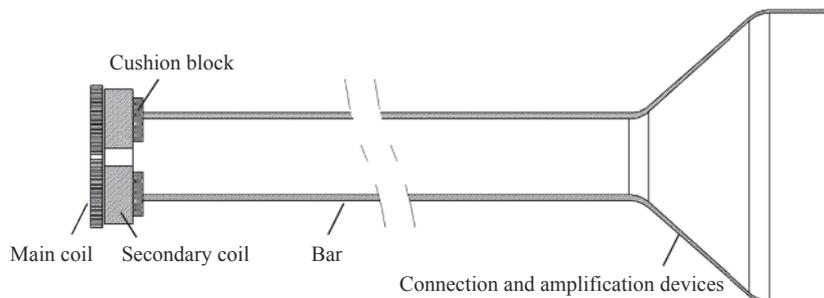


图 13 冲击试验装置剖面

Fig. 13 Cross section of impact test device

冲击试验装置中, 主动线圈外径 250 mm, 内径 10 mm, 匝数为 16 匝, 匝与匝之间的距离为 2.5 mm, 每匝的横截面为宽 5 mm、高 20 mm 的矩形。次级线圈为外径 240 mm、内径 20 mm、厚 35 mm 的铜块。垫块为外径 210 mm、内径 50 mm、厚 15 mm 的钨合金块。波导杆外径为 150 mm、内径 130 mm、长 7 m 的 TC4 钛合金长杆。根据前文分析, 在次级线圈和波导管之间加入了垫块。

3.2 冲击试验装置的模拟结果

当电容放电电压为 3 500 V, 电容值为 40 mF 时, 加速度曲线如图 14 所示。加速度峰值为 7 540g, 脉宽为 1.1 ms。模拟结果表明, 提出的冲击试验装置能够产生高幅值长脉宽的加速度载荷。

加载装置各部件最大应力见表 2, 可以看出, 各部件的最大应力均没有超过材料的屈服强度。整个加载阶段各部件均处于弹性变形范围, 因此整个冲击试验装置可以做到长时间重复多次试验。

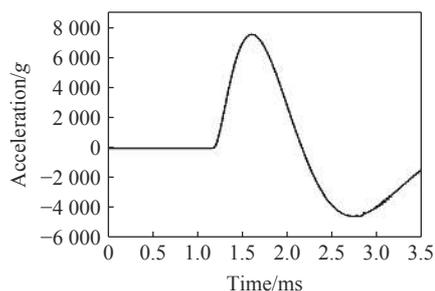


图 14 冲击试验装置加速度值

Fig. 14 Acceleration curve of impact test device

表 2 模拟时主要部件最大应力

Table 2 Max stress of each part in simulation			
部件	材料	屈服强度/ MPa	模拟最大 应力/MPa
主动线圈	紫铜	76	58
次级线圈	无氧铜	300	200
垫块	钨	1300	750
加载杆	TC4钛合金	900	735
连接与放大装置	TC4钛合金	900	845

取电容值为 40 mF, 放电电压分别为 3 500、3 000、2 500、2 000、1 500 和 1 000 V, 不同电压下加速度曲线如图 15 所示。无论电压值如何变化, 加速度曲线的脉宽几乎不发生改变。加速度幅值随着放电电压的增大而增大。如图 16 所示, 为加速度峰值随电压变化的曲线, 可以看出, 随着电压的增大, 加速度峰值的增大趋势会越来越来大。

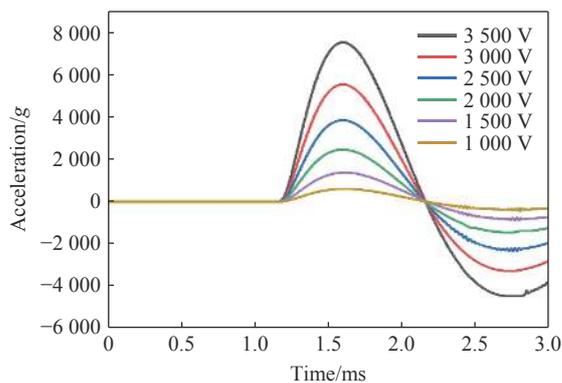


图 15 电压值对加速度的影响

Fig. 15 Effect of voltage on acceleration

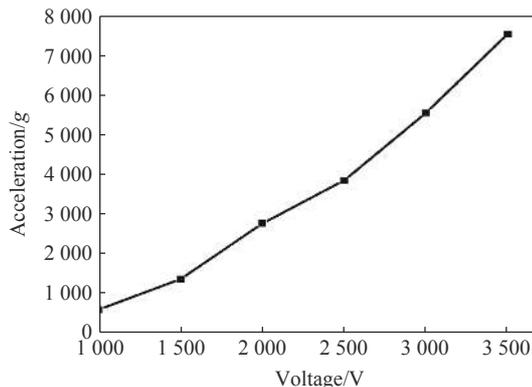


图 16 加速度峰值与电压的关系

Fig. 16 Relationship between peak of acceleration and voltage

电压为 3 500 V, 电容值分别为 40、30、20、15、10 和 5 mF 时加载装置末端面加速度曲线见图 17。可以看出, 电容越大加速度曲线脉宽越长, 加速度峰值越高。且在波导杆长度确定的情况下, 加速度曲线脉宽和峰值增大的幅度越来越小。图 18 为电容变化时主动线圈的电流曲线, 从图中可以看出, 电容越大电流的峰值越大, 其脉宽越长。

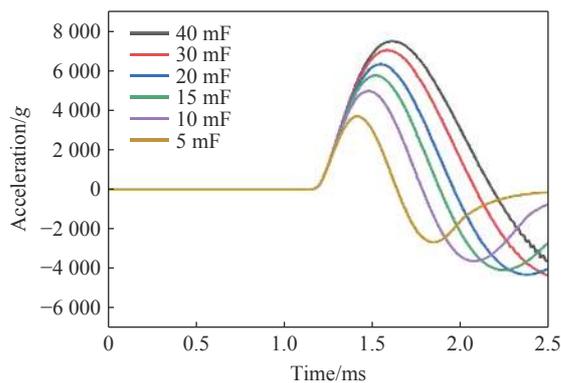


图 17 电容值对加速度的影响

Fig. 17 Effect of Capacitance on acceleration

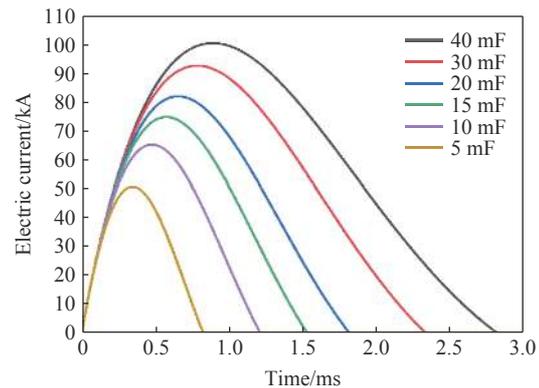


图 18 电容值与电流的关系

Fig. 18 Relationship between capacitance and electric current

4 结 论

采用电磁 Hopkinson 杆技术,进行了不同电压下的加速度冲击试验,并对试验进行了模拟分析,提出了一种可产生高幅值长脉宽加速度过载环境的冲击试验装置设计方案,并通过数值模拟展示了电路参数对加载结果的影响。主要结论如下:

(1) 加速度试验结果重复性好,可控性强,与理论结果基本一致,证明了试验方法的可靠性;

(2) 应力波模拟结果和试验结果基本一致,证明了模拟模型的准确性,加速度载荷差别的原因主要与加速度传感器和试验装置之间的约束有关;

(3) 基于电磁 Hopkinson 杆模型,提出了具有高精度、高重复性、强可控性、加载结果兼顾长脉宽和高幅值技术优势的新型冲击试验装置,弥补了传统地面冲击试验技术的缺陷。模拟结果表明,试验装置中的电容充电电压越高,加载结果的峰值越高;电容值越大,加载结果的脉宽值越大。通过调控电路参数值,可产生不同幅值和脉宽的加速度载荷。

参考文献:

- [1] 金恂叔. 航天器动力学环境试验的发展概况和趋势 [J]. *航天器环境工程*, 2003, 30(2): 15–21. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2003.02.003.
JIN X S. The development status and trends of spacecraft dynamic environment testing [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2003, 30(2): 15–21. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2003.02.003.
- [2] 丁继锋, 赵欣, 韩增尧. 航天器火工冲击技术研究进展 [J]. *宇航学报*, 2014, 35(12): 1339–1349. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2014.12.001.
DING J F, ZHAO X, HAN Z Y. Research development of spacecraft pyroshock technique [J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(12): 1339–1349. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2014.12.001.
- [3] WU Z B, MA T H, ZHANG Y B, et al. Ground simulation test of 2D dynamic overload environment of fuze launching [J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020: 2858640. DOI: 10.1155/2020/2858640.
- [4] 朱广生, 刘瑞朝, 周松柏, 等. 基于爆炸激波管的火箭级间段强度考核和分离试验研究 [J]. *航空学报*, 2015, 36(7): 2207–2213. DOI: 10.7527/S1000-6893.2015.0041.
ZHU G S, LIU R C, ZHOU S B, et al. Experimental research of strength check and stage separation for a rocket's stage section based on a blast simulator [J]. *Acta Aeronauticae Astronautica Sinica*, 2015, 36(7): 2207–2213. DOI: 10.7527/S1000-6893.2015.0041.
- [5] 张学舜, 沈瑞琪. 火工品动态着靶模拟仿真技术研究 [J]. *火工品*, 2003(4): 1–4. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2003.04.001.
ZHANG X S, SHEN R Q. Study on dynamic touch-target analog simulation technique for initiating explosive devices [J].

- [Initiators & Pyrotechnics](#), 2003(4): 1–4. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2003.04.001.
- [6] DAI K R, WANG X F, YI F, et al. Triboelectric nanogenerators as self-powered acceleration sensor under high-g impact [J]. [Nano Energy](#), 2018, 45: 84–93. DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.12.022.
- [7] XU F J, MA T H. Modeling and studying acceleration-induced effects of piezoelectric pressure sensors using system identification theory [J]. [Sensors](#), 2019, 19(5): 1052. DOI: 10.3390/s19051052.
- [8] 张伟, 沈瑞琪, 叶迎华, 等. 落球碰撞试验模拟火工品过载特性研究 [J]. [火工品](#), 2012(3): 4. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2012.03.002.
- ZHANG W, SHEN R Q, YE Y H, et al. Research on the Overloading Characteristics of Initiator Simulated by Falling Ball Impacting Experiment [J]. [Initiators & Pyrotechnics](#), 2012(3): 4. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2012.03.002.
- [9] DUAN Z Y, LUO T H, TANG D Y, et al. Potential analysis of high-g shock experiment technology for heavy specimens based on air cannon [J]. [Shock and Vibration](#), 2020: 5439785. DOI: 10.1155/2020/5439785.
- [10] TANG T, MA S J, LI F Y, et al. Research on overload signal of new impact body based on air cannon test and simulation [J]. [Journal of Physics: Conference Series](#), 2021, 2029: 012008. DOI: 10.1088/1742-6596/2029/1/012008.
- [11] 杨华. 高过载加速度试验装置结构设计与分析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 1–6.
- [12] FOSTER J T, FREW D J, FORRESTAL M J, et al. Shock testing accelerometers with a Hopkinson pressure bar [J]. [International Journal of Impact Engineering](#), 2012, 46: 56–61. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.02.006.
- [13] SHI Y B, ZHANG H, TANG J, et al. Anti-overload of a high-g acceleration sensor [J]. [Advanced Materials Research](#), 2011, 291: 3103–3107. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.291-294.3103.
- [14] NIE H L, SUO T, WU B B, et al. A versatile split Hopkinson pressure bar using electromagnetic loading [J]. [International Journal of Impact Engineering](#), 2018, 116: 94–104. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.02.002.
- [15] GUO Y Z, DU B, LIU H F, et al. Electromagnetic Hopkinson bar: a powerful scientific instrument to study mechanical behavior of materials at high strain rates [J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2020, 91(8): 081501. DOI: 10.1063/5.0006084.
- [16] 王维斌, 索涛, 郭亚洲, 等. 电磁霍普金森杆实验技术及研究进展 [J]. [力学进展](#), 2021, 51(4): 729–754. DOI: 10.6052/1000-0992-20-024.
- WANG W B, SUO T, GUO Y Z, et al. Experimental technique and research progress of electromagnetic Hopkinson bar [J]. [Advances in Mechanics](#), 2021, 51(4): 729–754. DOI: 10.6052/1000-0992-20-024.
- [17] TAKATSU N, KATO M, SATO K, et al. High-speed forming of metal sheets by electromagnetic force [J]. [JSME International Journal. Ser. 3, Vibration, Control Engineering, Engineering for Industry](#), 1988, 31(1): 142–148. DOI: 10.1299/jsmec1988.31.142.
- [18] 钟卫佳. 铜加工技术实用手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 73–119.
- [19] 刘旭阳. TC4 钛合金动态本构关系研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010: 7–28.

(责任编辑 王小飞)