

文章编号: 1001-4888(2017)01-0101-06

一种改进的冲量测试装置及其数据处理方法^{*}

王军评, 毛勇建, 杨琪, 岳晓红, 张赧纲, 吕剑

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川绵阳 621900)

摘要: 对摆锤式片炸药比冲量测试装置及其数据处理方法进行了改进。首先, 在对机械结构进行了改进设计的基础上, 利用光栅测试系统测量摆动角度, 并解决了测试时波形失真的问题, 提高了装置的精密性和稳定性。然后, 采用该装置研究了阻尼随摆动幅度的变化规律, 并用实测数据进行了验证; 提出了片炸药比冲量测试时的最大摆角修正方法, 并进行了试验对比研究。结果表明: 改进后的装置及其数据处理方法能够更加准确地测量片炸药的比冲量。

关键词: 片炸药; 比冲量; 光栅传感器; 摆锤式测试装置; 数据处理方法

中图分类号: O348.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-15-248

0 引言

片炸药加载是模拟强脉冲 X 射线诱导结构响应的一种常用方法^[1,2], 该方法是在获得准确的片炸药比冲量参数的基础上, 进行载荷设计的^[3-6], 因此测得的片炸药比冲量参数的准确程度是影响和制约试验模拟精确程度的主要因素之一。目前, 片炸药比冲量测量一般采用摆锤式结构, 测量装置主要有两种方式, 一种是采用指针一刻度盘的方式记录摆锤最大摆动角度来计算炸药比冲量^[3,7]; 另一种是采用角度编码器和数采系统记录摆锤的角度^[8]。

上述摆锤式测试装置中, 文[3,7]装置作为早期的片炸药比冲量测试装置, 结构比较简陋, 关键连接部位(例如摆锤与摆杆、摆杆与转轴等)精度不高, 容易松动, 在冲击载荷作用下状态很难保持; 角度测量采用指针一刻度盘模式, 测量的数值由人工判读, 一般会有超过 0.25° 的判读误差, 人工读数时也可能产生一定的夹角, 并且刻度盘依靠弹簧压紧, 人为触碰时会转动, 从而影响读数。文[8]比冲量测试装置虽然采用了角度编码器, 但机械结构中主轴与光栅转轴采用齿轮组连接, 由于啮合轮齿间的间隙, 引入了新的误差来源, 且在冲击载荷作用下, 编码器前 1/4 周期的输出信号失真, 不利于转角的精确测量。同时, 摆锤式测试装置转轴的运动为自由衰减摆动, 直接测量的结果是衰减后的角度。目前, 从公开报道的文献来看, 在后续的数据处理中, 都直接采用了测量的结果, 而没有对最大角度进行修正, 这也是片炸药比冲量的测量误差之一。

鉴于此, 本文发展了基于光栅传感器的摆锤式片炸药比冲量测试装置, 改进了机械结构, 解决了波形失真的问题, 利用该装置, 研究了阻尼随摆角的变化关系, 提出了片炸药比冲量标定时修正最大摆角的方法。

1 基于光栅传感器的摆锤式片炸药比冲量测试装置

本测试装置主要由机械装置、光栅传感器及数据采集系统组成。测试装置的改进包括机械部分改

^{*} 收稿日期: 2015-12-31; 修回日期: 2016-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(11102196)

通讯作者: 毛勇建(1976—), 男, 研究员, 博士。Email: maoyj@caep.cn

进和摆角测量系统改进。对机械部分,通过合理设计各零件之间的配合关系,提高了机械配合精度;对摆角测量系统,将摆角的机械指针测量改进为数字化测量(由光栅传感器和数据采集系统组成),提高测量精度。

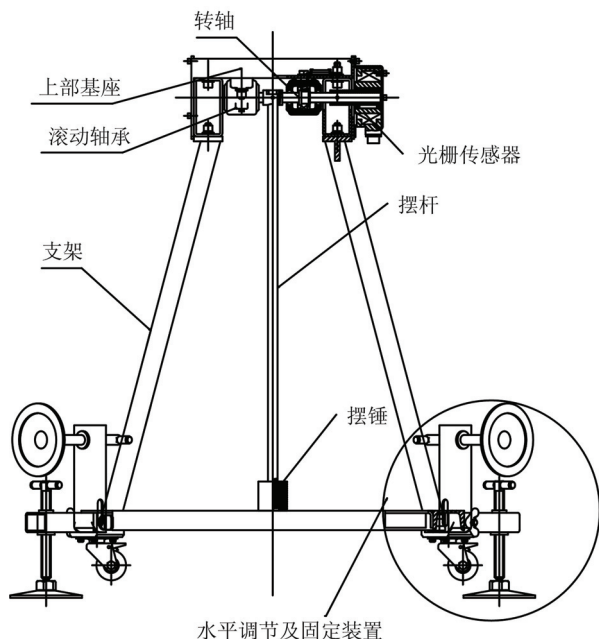


图 1 摆锤式比冲量测试装置的机械结构

Fig. 1 Mechanical structure of the pendulum-type specific impulse measuring apparatus

支架采用分体式结构,有利于提高上部基座的水平度。为了确保在工作时上部基座处于水平,在其上表面安装有水平仪,可对初始姿态进行调整,从而提高测试精度。支架上端与上部基座固定连接,其底部安装有四个滚轮和水平度调节及固定装置,以便于比冲量测试装置的移动以及测试时保持整体水平和稳定。

光栅传感器用于精确检测转轴的旋转角度。其内筒通过键连接固定套装于转轴的轴套上,为了防止转轴、轴套和光栅传感器内筒这三者之间产生相对扭转,转轴与轴套之间、轴套与键之间均采用过盈配合。

数据采集系统用于采集光栅传感器输出的信号并进行数据处理。

2 测试原理与方法

利用该装置进行片炸药比冲量测试(标定)的基本原理同文献[3,7]。标定时,在摆锤加载面粘贴缓冲层(本文用 8mm 厚海绵橡皮加 3mm 厚真空橡皮)和一片炸药样品,采用电雷管通过引爆药条引爆,并测量摆锤的最大摆角。

得到最大摆角后,通过刚体运动分析得到片炸药样品的比冲量。比冲量的计算公式通过机械能守恒原理和动量矩定理推导,其表达式为^[3,7]:

$$I_c = \frac{\sqrt{2JMgL_c(1 - \cos\theta)}}{SL_p} \quad (1)$$

式中, I_c 为片炸药比冲量(即单位面积片炸药产生的冲量); J 为摆锤(含杆)对转轴的转动惯量; M 为摆锤(含杆)的质量; g 为重力加速度; L_c 为摆锤(含杆)的质心距转轴的距离; θ 为摆锤最大摆角; S 为片炸药样品面积; L_p 为摆锤中心距转轴的距离。

由于片炸药的厚度具有分散性,所以需进行多次比冲量标定试验,然后采用线性拟合的方法获得片炸药比冲量和厚度的关系,用于片炸药加载试验设计。

本文通过固结于摆锤式测试装置转轴上的光栅传感器测量最大摆角(角度测量精度可达到 0.001°),并通过数采系统记录信号。其工作原理如图2所示。摆锤在片炸药爆炸加载产生的冲击载荷作用下摆动,并通过摆杆将转动传递给转轴。转轴带动光栅传感器的动光栅旋转,动光栅上刻有透光缝隙,定光栅刻有与动光栅相应的透光缝隙。当动光栅旋转时,光敏元件会接受到透过动、定光栅的光线,并转化为电信号。电信号通过放大与整形后,再由数采系统实现实时采集和数据处理。

与指针一刻度盘模式相比,光栅传感器在爆炸冲击载荷作用下,会诱发结构的高频振动,从而引起光栅的瞬间往返和停转,使部分的数据失真^[8,9]。为了解决此问题,本文采用文[9]的方法,将传感器A、B相输出的脉冲信号按跃变时刻译码,存储于动态数组,当取出的译码不满足循环顺序,则保持角度不变,从而保证了取值的准确性。

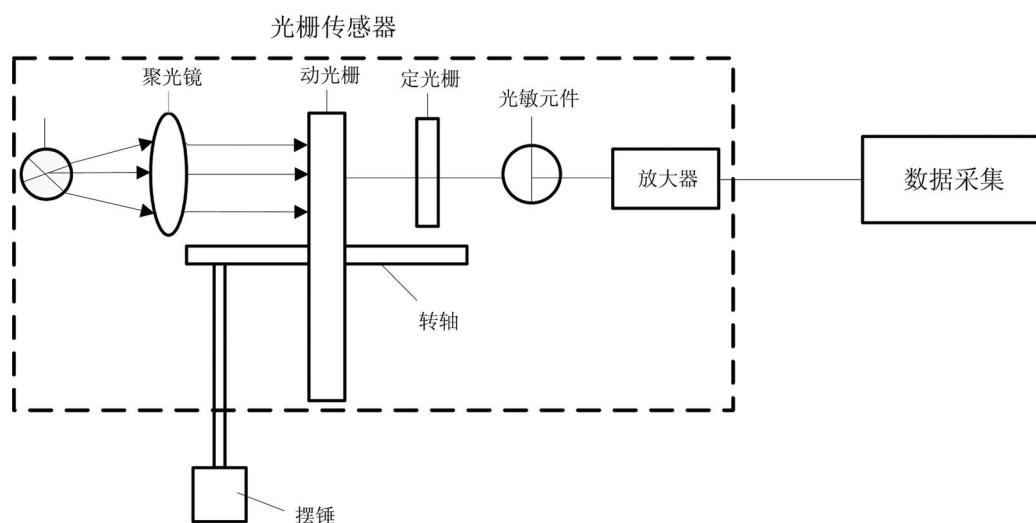


图2 测试系统工作原理图

Fig. 2 The testing system illustrative diagram

3 试验结果与分析

3.1 阻尼系数的获取、验证及最大摆角修正方法

将测试装置的摆锤从某一初始位置自由释放,通过光栅传感器,测得在阻尼作用下的摆动幅度随时间变化的曲线。在小阻尼作用下,摆锤的运动具有如下的形式:

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\beta t} \cos[\omega_r t + \varphi(t)] \quad (2)$$

式中, θ_0 为摆动初始角; $\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 + \beta^2}$, ω_0 为无阻尼下标定装置的角频率。

若测得摆动幅度随时间的变化曲线 $\theta(t)$,通过式(2)即可获得随摆动幅度变化的阻尼系数。图3给出了阻尼系数随摆动幅度的变化曲线。由图可见阻尼系数随摆动幅度基本呈现指数型单调递减的趋势,随摆动幅度的增大,阻尼系数减小。拟合得到阻尼系数与摆动幅度的关系为:

$$\beta = e^{(-1.13864 - 0.06947\theta + 0.000596\theta^2)} \quad (3)$$

图4给出了摆锤的角度随时间变化的实测曲线和通过已知的阻尼系数反推的曲线的对比。由图可见,实测曲线和反推曲线趋势和峰值吻合,说明获得的阻尼系数是有效的、合理的。

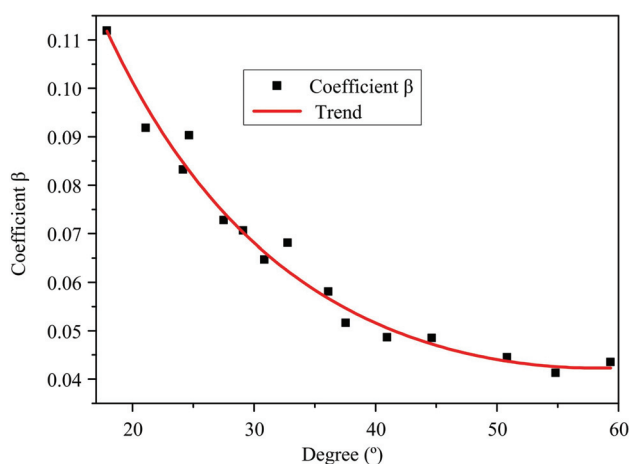


图3 阻尼系数随摆动幅度的变化曲线

Fig. 3 Damping coefficient vary with angle

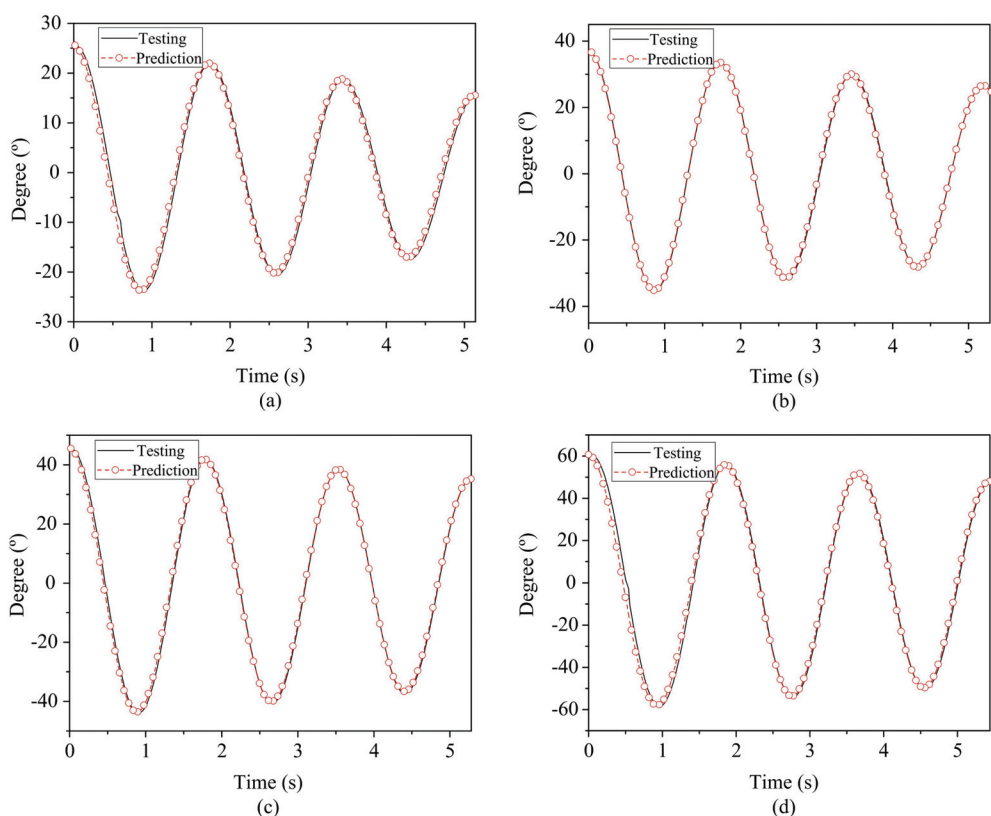


图 4 摆动幅度随时间变化的实测曲线与反推曲线对比

Fig. 4 Comparison of angle history between by directional measurement and by prediction



图 5 比冲量测试试验

Fig. 5 Specific impulse testing of sheet explosive

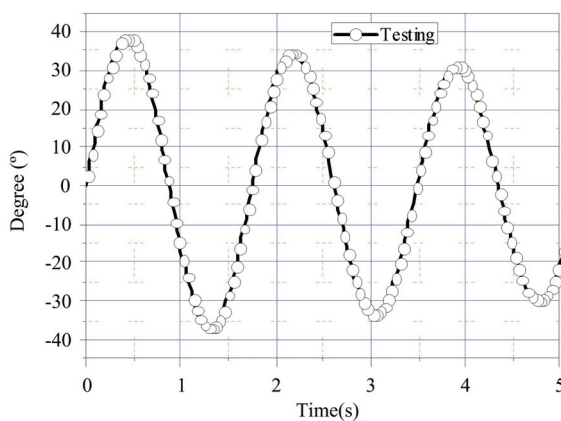


图 6 片炸药标定角度测试结果

Fig. 6 Specific impulse testing angle history of sheet explosive

3.2 片炸药比冲量实测分析

在获得阻尼系数的基础上,采用改进后的装置对片炸药进行了测试试验,如图 5 所示。标定前,在摆锤加载面粘贴一片炸药样品,采用电雷管通过引爆药条引爆,通过光栅传感器测量摆锤摆角变化的时间历程,测试的典型结果如图 6 所示。由图可见,在阻尼的作用下,其角度是随时间衰减的。将通过图 3 所获得阻尼系数随角度的变化关系和所测的最大摆角及最大摆角出现的时刻(由图 6 可知,测得的最大摆角为加载后四分之一周期时的角度)代入式(2),即可获得修正后的最大摆角。利用加载面为 $60\text{mm} \times 60\text{mm}$ 的测试装置,对 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的药片进行测试,共进行了 5 发片炸药比冲量测试的试验。测得的最大角度和修正后的结果具体见表 1。

表1 实测和修正后的最大摆角(°)

Tab. 1 Directional measurement maximum angle and revised maximum angle (°)

状态	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
实测	32.83	38.28	35.11	32.56	36.03
修正	33.74	39.19	36.02	33.43	36.94

获得最大摆角后,通过式(1)即可计算出比冲量,再根据试验前测量的药片四个直角位置厚度,得到比冲量与平均厚度的关系见图7。从图中的结果可见,比冲量基本随厚度的增加而增大,线性度较好,但有一定的分散性。对两组数据分别线性拟合,改进前的相关系数为0.79,改进后提高为0.87。说明与改进前装置(指针一刻度盘)测试结果比较,改进后测试结果线性度更好、离散度更小、结果更精确。

为评价测试装置的改进效果,依据JJF1059—1999《测量不确定度评定与表示》对各不确定度分量和测量结果进行了不确定度评定。首先,对式(1)中影响测试结果的各因素进行了分析,发现影响最终结果的因素中,角度测试结果为主要因素,其余各因素则为高阶小量(且改进后优于改进前),因此仅对角度测试结果进行分析,则可反映出装置的改进效果。分析表明改进前角度测试系统不确定度来源主要由摆角测试系统重复性误差、量角器测量引入误差、摆动面与量角器夹角引入误差组成,对各不确定来源进行分析评估,可得到改进前系统的扩展不确定度为:

$$U = t_p(\nu) u_c = 2.01 \times 0.383 = 0.77^\circ \quad (4)$$

式中, $t_p(\nu)$ 为按置信概率 $p=0.95$,系统的有效自由度为46.3,查 t 分布临界值得 $t_{0.95}(46.3)=2.01$; u_c 为标准不确定度。

改进后角度测试系统不确定度来源主要由摆角测试系统重复性误差、编码器测量引入误差、摆动面与量角器夹角引入误差三部分组成,通过分析可得到改进后系统的扩展不确定度为:

$$U = t_p(\nu) u_c = 2.08 \times 0.09 = 0.187^\circ \quad (5)$$

式中, $t_p(\nu)$ 为按置信概率 $p=0.95$,系统有效自由度为21.3,查 t 分布临界值得 $t_{0.95}(21.3)=2.08$; u_c 为标准不确定度。

由此可见,改进后摆锤角度测试的不确定度显著降低,降低幅度为75.7%。

4 结语

(1) 对机械结构进行了改进,通过合理的结构设计,提高了比冲量测试装置中转轴、摆杆、摆锤等关键件的配合精度;改进了摆杆与摆锤的螺纹联接方式,采用定位槽、销钉及键槽连接,使摆锤无法转动;改进后的装置的精密性和稳定性得到了提高;

(2) 改进了角度测量系统,通过程序设计,有效解决了测试时波形失真的问题,其不确定度显著降低(降低幅度为75.7%);为获得更加准确的片炸药加载设计参数提供了测试手段;

(3) 利用该装置,研究了阻尼随摆动幅度的变化关系,并用实测数据验证了阻尼系数的有效性,结果表明阻尼系数随摆动幅度的增大基本呈现指数型单调递减的趋势;提出了片炸药比冲量标定时修正最大摆角的方法,并进行了试验对比研究;发现比冲量随厚度的增加基本呈线性增大,但有一定的分散性;与改进前装置(指针一刻度盘)测试结果相比,改进后测试结果线性度更好,结果更准确。

参考文献:

- [1] Rivera W G, Benham R A, Duggins B D, et al. Explosive technique for impulse loading of space structures [R].

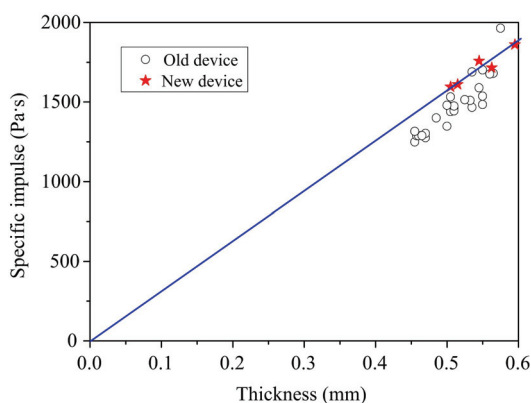


图7 改进前后的比冲量测试结果比较

Fig. 7 Comparison of testing specific impulse between the old and improved impulse testing device

- SAND-99-3175C, 1999.
- [2] 毛勇建, 邓宏见, 何荣建. 强脉冲软 X 射线喷射冲量的几种模拟加载技术[J]. 强度与环境, 2003, 30(2):55—64 (MAO Yongjian, DENG Hongjian, HE Rongjian. Several simulation techniques of blow-off impulses by intense pulsed cold X-rays [J]. Structure & Environment Engineering, 2003, 30(2):55—64 (in Chinese))
- [3] Mao Y J, Deng H J, Li Y L, et al. A rod-explosive technique for testing structural responses induced by X-ray blow-off impulses [J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 29-32:72—77.
- [4] Bessey R L, Hokanson J C. Simultaneous and running impulsive loading of cylindrical shells [R]. AD-A012-268, 1975.
- [5] 邓宏见, 肖宏伟, 何荣建, 等. 片炸药爆炸加载下壳体结构响应研究[C]. 第八届全国爆炸力学学术会议论文集, 2007:206—212 (DENG Hongjian, XIAO Hongwei, HE Rongjian, et al. Structural response of cylindrical shells subjected to external impulsive loads applied with slice explosive [C]. Proceeding of the 8th National Conference of Explosion Mechanics, 2007:206—212 (in Chinese))
- [6] 毛勇建, 李玉龙, 陈颖, 等. 炸药条加载圆柱壳的数值模拟(Ⅱ):解耦分析与试验验证[J]. 高压物理学报, 2013, 27(1):76—82 (MAO Yongjian, LI Yulong, CHEN Yin, et al. Numerical simulation of loading cylindrical shell by explosive rods (Ⅱ): Decoupling analysis and experimental validation [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(1):76—82(in Chinese))
- [7] 岳晓红, 毛勇建, 何荣建, 等. 片状炸药的比冲量标定技术[C]. 2002 年全国火炸药技术及钝感弹药学术研讨会论文集, 2002:396—398 (YUE Xiaohong, MAO Yongjian, HE Rongjian, et al. Specific impulse calibration of the sheet explosive [C]. Proceeding of the National Symposium of Explosives Techniques and Insensitive Ammunition, 2002:396—398(in Chinese))
- [8] 门朝举, 王占江, 郭志昀, 等. 基于冲击摆的片炸药比冲量测量技术[C]. 第七届全国爆炸力学实验技术学会会议论文集, 2012:49—53 (MEN Chaoju, WANG Zhanjiang, GUO Zhijun, et al. Specific impulse measurement of the sheet explosive with impact pendulum [C]. Proceeding of the 7th National Symposium on Experimental Techniques in Mechanics of Explosion, 2012:49—53(in Chinese))
- [9] 文明, 洪延姬, 王俊花, 等. 增量式旋转编码器在复摆法冲量测量中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(1):140—144 (WEN Ming, HONG Yanji, WANG Junhua, et al. Application of incremental revolving encoder in impulse measurement with compound pendulum [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(1):140—144(in Chinese))

On the Improvement of Impulse Measurement Device and its Data Processing Method

WANG Jun-ping, MAO Yong-jian, YANG Qi, YUE Xiao-hong, ZHANG Cheng-gang, LV Jian
(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: In this paper, the improvement of a pendulum-type device for measuring sheet explosive specific impulse and its data processing method is recommended. First of all, based on the improvement of device mechanical structure, the pendulum swing angle was measured by grating testing system, which has solved the waveform distortion problem in measurement and improved the accuracy and stability of device. Then, the variation of damping coefficient along with the swing amplitude was studied by this improved device, which was verified by experimental data. Correcting method for the maximum swing angle in sheet explosive specific impulse measurement was proposed, and comparative experiment was carried out. Results show that improved measurement device and its data processing method can more accurately measure sheet explosive specific impulse.

Keywords: sheet explosive; specific impulse; grating sensor; pendulum-type measuring device; data processing method