

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.05.019

# 高速摄像系统用于陶瓷复合靶板的 动态参数测量研究

张绪淦, 陈 斌, 安子阳, 梧顺青

(国防科技大学 指挥军官基础教育学院, 湖南 长沙 410072)

**摘要:** 提出了高速摄像系统用于陶瓷复合靶板动态参数测量方法。对射弹作用后的陶瓷/金属复合靶板的动态测量问题进行了试验研究和理论分析, 利用数字图像处理技术中的二值化、数学形态学滤波、像素面积计数、Hough 变换等对图像进行预处理, 再对射弹作用后飞散陶瓷碎片的分布面积以及运动平均速度进行了测量。研究表明, 本方法能准确、有效地获取相关试验数据。

**关键词:** 高速摄像; 陶瓷复合靶板; 动态参数测量

中图分类号: TB872

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)05-0087-03

## The High-Speed Camera System Used for Measuring the Dynamic Parameters of Ceramic Composite Target

Zhang Xugan, Chen Bin, An Ziyang, Wu Shunqing

(Basic Education School For Officers, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China)

**Abstract:** A method of the high-speed camera system used for measuring the dynamic parameters of ceramic composite target is presented. Experimental study and theoretical analysis were made on the shot ceramic/metal composite target plate dynamic measurement problems. Based on the digital image processing technology, binarization, morphological filtering, pixel area count and hough transform were used to preprocess image, measure the distribution area and the average speed of the ceramic fragments shot by projectiles. The results show that this method obtains the relevant experimental data accurately and efficiently.

**Keywords:** high-speed camera; ceramic composite target; dynamic parameter measurement

陶瓷和钢板构成的陶瓷/金属复合装甲, 将韧性材料和高硬度的脆性材料结合在一起, 具有高硬度、高抗压强度、高韧性、低密度等良好的抗弹性能<sup>[1]</sup>。长期以来, 对陶瓷复合靶板的动态力学性质及其抗侵彻能力的研究, 一直是防护工程领域研究的热点。射弹作用后陶瓷复合靶板的动态参数对研究其抗弹机理至关重要, 是侵彻试验测量中的重要内容。传

统的侵彻试验测量方法(如传感器、胶片式相机测量等)存在着设备操作使用复杂、数据处理过程繁琐、试验费用高等不足, 不能快速有效地获取相关试验的测量数据。而高速摄像是人眼视觉能力在时间分辨能力方面的延伸, 因其使用方便、实时性强、图像数据易于保存处理等优点而被广泛应用于各种高速现象的研究, 现已成为弹道试验研究中不可缺

收稿日期: 2012-07-12

作者简介: 张绪淦(1986-), 男, 江西九江人, 国防科技大学硕士生, 主要研究方向为弹道实验测量与冲击侵彻效应,

E-mail: zhangxugan2006@163.com

少的测试技术。在实验过程中, 其将炮弹瞬息即逝碰靶前后的高速现象进行“冻结”, 进行真实地记录和“再现”, 以供事后进行深入细致地分析, 获取重要的试验参数<sup>[2]</sup>。本文基于已有试验条件, 提出了将高速摄像系统用于陶瓷/金属复合靶板的动态参数测量, 对射弹作用后飞散陶瓷碎片的面积分布以及运动速度测量方法进行了试验研究和理论分析。

## 1 试验测量系统

### 1.1 试验测量系统组成

试验测量系统如图1所示, 由以下几部分组成:

- 1) 加载装置。12.7 mm 弹道枪, 可发射 12.7 mm 口径穿燃弹, 弹速为 750~840 m/s。
- 2) 测速装置。光幕靶、六路电子测时仪。
- 3) 被测目标。12.7 mm 口径穿甲燃烧弹、陶瓷/金属复合靶板。
- 4) 固定支架。钢铁角架用于固定靶体。
- 5) 回收装置。沙袋内填细沙, 用于回收弹丸。
- 6) 高速摄像系统。高速摄像机用于拍摄记录弹体侵彻靶板的高速瞬时过程; 计算机用于采集、传输、存储、处理序列图像; 触发器发射触发信号, 控制高速摄像机工作状态; 背景屏上设置参考标志, 用于获取影像缩小率; 光源用于增强照明度, 提高拍摄图像亮度。本实验采用 Photron 公司生产的高速摄像机 FASTCAM SA1.1, 最大帧频为  $6.75 \times 10^5$  f/s。

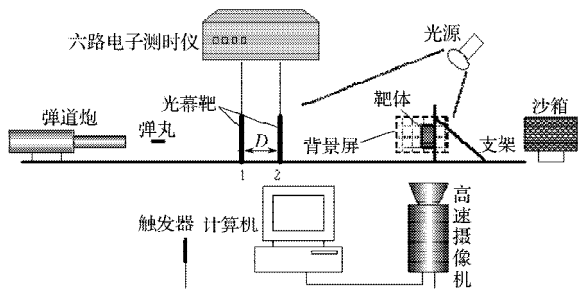


图1 试验测量系统示意图

Fig. 1 The experimental measurement system diagram

### 1.2 高速摄像系统布设方法

为保证测量精度, 对高速摄像系统的布设有一定的要求, 布设方法<sup>[3]</sup>如下:

1) 高速摄像机应布设在靶体侧方一定距离处, 摄像系统光学视轴应与弹体运动方向所在的铅垂面(弹道平面)垂直, 保证弹道射面与摄像系统成像平面平行。

2) 在弹道平面与高速摄像系统之间布设 2 个参考标志。本试验采用在背景屏上设置一个标尺和一

张网格靶, 用于获取影像缩小率。背景屏位于摄像系统视场可覆盖的范围内, 且与弹道平面平行。

3) 被测目标的运动不能超出高速摄像机的视场范围。

### 1.3 高速摄像系统外定标

侵彻试验相关参数的测量实际上主要是被测目标空间位置的测量。对于高速摄像系统而言, 通常采用外定标法完成目标空间位置的测量。顾名思义, 外定标法就是在高速摄像视场范围的内设置若干(通常为 2 个)参考标志, 且参考标志上基准点间的间距已知或可测, 由参考标志确定影像缩小率  $m$ , 其计算方法为

$$m=f/d=l/L, \quad (1)$$

式中:  $L$  为参考标记(标尺)上两基准点的物理距离;  $l$  为两基准点在图像坐标中的距离;  $d$  为高速摄像机离弹道平面的距离;  $f$  为高速摄像光学系统的焦距。

视场内任意两点间的物理距离可以通过像素坐标判读和影像缩小率  $m$  计算得出, 由此完成空间位置的测量。

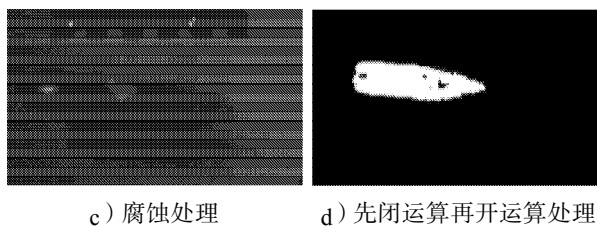
## 2 图像预处理

为了改善视觉效果, 便于后续图像特征测量, 首先, 需要对图像进行预处理, 包括彩色图像灰度化、滤波、二值化、图像形态学处理等。将高速摄像机拍摄采集的彩色图像转化为 256 色的灰度图像。由于在采集图像的过程受到光照不均匀、背景亮度变化等影响, 图像会存在噪声, 需要对灰度图像进行滤波处理。本文采用中值滤波方法处理图像噪声, 处理后的图像见图 2a。处理图像噪声后, 采用最大熵法<sup>[4]</sup>对图像进行二值化处理。若二值化后的图像表面还存在着小面积孔洞和细小孤立点, 需要进一步对二值图像进行处理, 使之更适合于图像测量。二值形态学处理的基本运算有膨胀和腐蚀运算, 处理效果见图 2b 和 c, 其不同的运算顺序可构成开运算和闭运算。开闭运算都能够平滑边缘, 但是, 开运算能消除细小物体, 而闭运算能填充物体孔洞。本文对二值图像先闭运算再开运算, 可以有效地滤除了图像中的细小孤立点, 有利于目标区域面积计算, 如图 2d 所示。



a) 中值滤波去噪图

b) 膨胀处理



c) 腐蚀处理 d) 先闭运算再开运算处理

图2 弹丸图像预处理图

Fig. 2 Projectile image preprocessing

### 3 陶瓷 / 金属复合靶板的动态参数测量方法

#### 3.1 射弹作用后飞散陶瓷碎片的面积测量方法

常用的像素面积计算方法<sup>[5]</sup>是统计边界及其内部的像素总数。由像素面积计算方法可知,物体像素面积的计算较简单,求出物体边界内像素点的总和即为面积,该计算公式为

$$A = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M f(x, y), \quad (2)$$

式中,  $f(x, y)$  为图像灰度函数。对二值化图像而言,目标区域是白色的(像素值为1),而背景是黑色的(像素值为0),则目标区域像素面积就是统计  $f(x, y)=1$  的像素总数。

飞散陶瓷碎片面积  $S$  可以通过其像素面积除以影像缩小率计算得出,即

$$S = A / (m_x \times m_y), \quad (3)$$

式中,  $m_x, m_y$  分别为  $x, y$  方向上的图像缩小率,通常取  $m_x = m_y = m$ 。

#### 3.2 飞散陶瓷碎片的运动速度测量方法

##### 3.2.1 陶瓷碎片亚像素定位

陶瓷碎片的运动速度测量,首先需要完成其空间位置测量,可以利用亚像素算法将陶瓷碎片的定位精度提高到亚像素甚至更高的水平,能够稳定实现 0.02~0.03 像素的细分精度。形心法、灰度相关匹配法和边缘拟合法是 3 种有效的亚像素图像处理算法<sup>[6]</sup>。形心法不仅直观、计算简单,而且对于图像特征区域明显的特征点有较高的处理精度,且抗干扰性较强。本文采用形心法确定像素坐标系中陶瓷碎片的精确位置,该算法定义如下:

$$\bar{x} = \frac{\sum_x \sum_y x f(x, y)}{\sum_x \sum_y f(x, y)}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_x \sum_y y f(x, y)}{\sum_x \sum_y f(x, y)}$$

其中  $(\bar{x}, \bar{y})$  为目标形心坐标。

##### 3.2.2 陶瓷碎片运动速度测量

假定射弹作用后反向飞溅的陶瓷碎片大部分在弹道平面内运动,陶瓷碎的运动速度测量公式为

$$v = \frac{\Delta s}{m \times \Delta t}, \quad (4)$$

式中:  $v$  为陶瓷碎片在  $\Delta t$  时间内的平均速度;  $\Delta s$  为前后两帧图像中陶瓷碎片发生的位移,由亚像素定位法确定同一碎片在前后两帧图像中的坐标位置,进而求得  $\Delta s$ ;  $\Delta t$  为两帧图像之间的时间间隔,由高速摄像帧频确定  $\Delta t$  为 33.3  $\mu s$ 。

### 4 结论

随着防护工程领域研究的深入,需要获取更为精确、全面的实验数据以进行理论分析,高速摄像系统及数字图像处理技术将以其数字化优势在防护工程实验研究具有重要的应用价值和广阔的应用前景。本文用高速摄像系统实现了射弹作用后陶瓷复合靶板的动态参数测量,经多次测试试验表明,该方法具有较高的精度和较好的自动化程度,可快速算出陶瓷面板破碎的飞溅耗能,对陶瓷材料抗弹机理研究以及抗弹性能评估具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] Woodward R L, Gooch W A, O' Donnell R G, et al. A Study of Fragmentation in the Ballistic Impact of Ceramics [J]. *Int. J. Impact Eng.*, 1994, 15(5): 605-618
- [2] 杨成祥, 郭世明, 何承基. 数字式相机在靶场中的测试研究[J]. *探测与控制学报*, 2003, 25(2): 9-11.  
Yang Chengxiang, Guo Shiming, He Chengji. A Study on the Use of Digital Camera in the Range Test[J]. *Journal of Detection & Control*, 2003, 25(2): 9-11.
- [3] 王建军. 火箭弹离轨参数自动测量研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.  
Wang Jianjun. Study on Automatic Measurement of Rocket Projectile Deorbit Parameters[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [4] 孙即祥. 图像处理[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 239-241.  
Sun Jixiang. *Image Processing*[M]. Beijing: Science Press, 2005: 239-241.
- [5] 陈天华. 数字图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 87-153.  
Chen Tianhua. *Digital Image Processing*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 87-153.
- [6] 于起峰, 陆宏伟, 刘肖琳. 基于图像处理的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 132-163.  
Yu Qifeng, Lu Hongwei, Liu Xiaolin. *Precision Measurement and Motion Measurement Based on Image Processing*[M]. Beijing: Science Press, 2007: 132-163.

(责任编辑: 邓 彬)

