文章编号：1003-1480（2026）01-0106-07

破片测速技术研究进展

田昕宇，蒋海燕，毛伯永

（西安近代化学研究所，陕西 西安，710065）

摘 要：破片速度是评估战斗部毁伤效能的关键参数。随着精确毁伤技术的发展，多破片、多参数同步测试需求对现有测速技术提出了更高挑战。本文从电测与光测两大技术路径出发，系统综述了靶网测速、线圈靶、光幕靶、天幕靶及高速摄影等主流破片测速方法的基本原理、适用条件与技术局限；结合国内外最新研究成果，梳理了在破片群分辨、测量精度提升、多参数同步获取、数据采集优化及靶材改进等方面的典型改进策略；进一步探讨了多普勒雷达等新型测速技术的应用潜力。最后，针对当前破片测速领域在个体目标匹配、信号特征深度挖掘及抗干扰能力等方面存在的瓶颈，展望了融合时空关联算法、机器学习与多谱段成像的智能化、高精度测速发展方向，以期为毁伤评估与破片威力场构建提供技术支撑。

关键词：破片测速技术；电测技术；光测技术；多参数同步测量；毁伤评估

中图分类号：TJ450.3；TJ410.6 **文献标识码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003-1480.2026.01.017

Research Progress of Fragment Velocity Measurement Technology

TIAN Xin-yu，JIANG Hai-yan，MAO Bo-yong

（Xi’an Modern Chemistry Research Institute, Xi’an, 710065）

Abstract：Fragment velocity is a critical parameter for evaluating the destructive effectiveness of warheads. With the advancement of precision damage technologies, the demand for simultaneous measurement of multiple fragments and multi-dimensional parameters poses higher challenges to existing velocity measurement methods. This paper systematically reviews mainstream fragment velocity measurement techniques, including target network, coil target, light screen target, sky screen target, and high-speed photography, from the perspectives of electrical and optical measurement. The fundamental principles, applicable conditions, and technical limitations of each method are analyzed in depth. Based on the latest domestic and international research progress, representative improvement strategies are summarized, covering fragment group resolution, measurement accuracy enhancement, synchronous multi-parameter acquisition, data acquisition system optimization, and target material innovation. Furthermore, the application potential of emerging technologies such as Doppler radar is discussed. Finally, in response to current bottlenecks, including individual fragment association in dense fragment fields, insufficient exploitation of signal waveform features, and susceptibility to environmental interference, future research directions are proposed, emphasizing intelligent, high-precision measurement systems integrating spatiotemporal association algorithms, machine learning, and multi-spectral imaging, thereby providing technical support for damage assessment and fragment field characterization.

Key words：Fragment velocity measurement technology; Electrical measurement technology; Optical measurement technology; Multi-parameter synchronous measurement; Damage assessment

破片作为战斗部重要毁伤元之一，精确测量破片群速度参数对于评估战斗部毁伤效能、构建破片威力场具有重要意义。破片测速技术依据原理差异可划分为电测技术和光测技术[1]。电测技术主要包括靶网测

收稿日期：2025-08-29
作者简介：田昕宇（2000-），男，在读硕士研究生，从事破片测速技术研究。
通讯作者：蒋海燕（1985-），女，博士，研究员，从事毁伤评估技术研究。
引用本文：田昕宇，蒋海燕，毛伯永. 破片测速技术研究进展[J]. 火工品, 2026(1): 106-112.

速技术和线圈靶测速技术；光测技术主要包括光幕靶测速技术、天幕靶测速技术以及高速摄影测速技术。

随着毁伤评估技术的持续发展，对破片测速技术的测量精度和功能性提出了更为严苛的要求。当前主流的破片测速方式在破片群多参数同步测量、破片参数精确测量等领域仍然存在一定的局限性[2-3]。本文将对目前主流的破片测速技术进行了梳理，深入分析其各自的优势与局限，并通过查阅相关文献，探索可行的改进措施。最后，将结合毁伤评估领域的发展趋势，对破片测速技术未来的发展方向及重点领域进行展望。

1　电测技术

电测技术主要包括靶网测速技术和线圈靶测速技术。由于战斗部爆炸产生的破片在空间上的分布广泛，导致线圈靶测速技术设备布设的难度远高于靶网测速技术。因此，在需要大范围布设测量设备的破片测试场景中，目前主要采用靶网测速技术。

靶网测速技术主要基于区截测速原理：在爆炸测试环境中布设一个或多个靶网组合，通过数据采集系统记录战斗部爆炸时破片穿透各层靶网的时间，结合已知的战斗部与靶网之间的空间距离参数，利用时间-位移关系计算得出破片的速度参数[4]。靶网测速原理如图 1 所示。

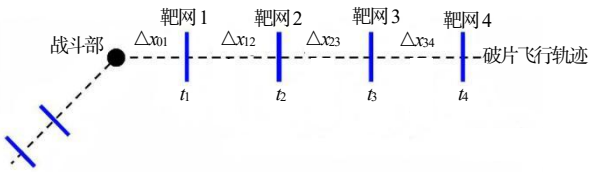


图 1　靶网测速技术原理图

Fig.1　Schematic diagram of target network speed measurement technology

图 1 中 t_1、t_2、t_3、t_4 分别为破片击穿各靶网的时刻；Δx_{01} 为战斗部到靶网 1 的距离；Δx_{12}、Δx_{23}、Δx_{34} 为相邻靶板间距。根据时间-位移关系，可以得到破片在两块靶网之间运动平均速度：

$$v_{12}=\frac{\Delta x_{12}}{t_2-t_1} \qquad (1)$$

$$v_{23}=\frac{\Delta x_{23}}{t_3-t_2} \qquad (2)$$

$$v_{34}=\frac{\Delta x_{34}}{t_4-t_3} \qquad (3)$$

式（1）~（3）中：v_{12} 为破片在靶网 1 和靶网 2 之间运动的平均速度；v_{23} 为破片在靶网 2 和靶网 3 之间运动的平均速度；v_{34} 为破片在靶网 3 和靶网 4 之间运动的平均速度。利用其中任意两个速度值即可求出破片的速度衰减系数 α 和初速 v_0，以 v_{12}、v_{23} 为例，破片的速度衰减系数 α 和初速 v_0 计算公式如下：

$$\alpha=\frac{2(\ln v_{12}-\ln v_{23})}{\Delta x_{23}-\Delta x_{12}} \qquad (4)$$

$$v_0=\frac{v_{12}}{e^{-a(\Delta x_{01}+\frac{\Delta x_{12}}{2})}} \qquad (5)$$

式（4）~（5）中：α 为破片的速度衰减系数；v_0 为破片初始速度。

靶网测速技术试验场地布置示意图如图 2 所示。其中用到的靶网主要有网靶、铝箔靶、梳状靶，靶网结构如图 3 所示。

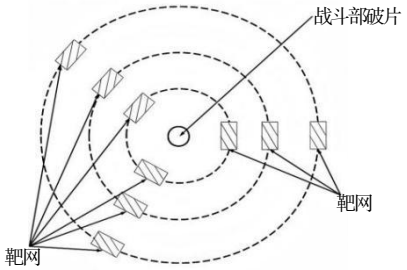
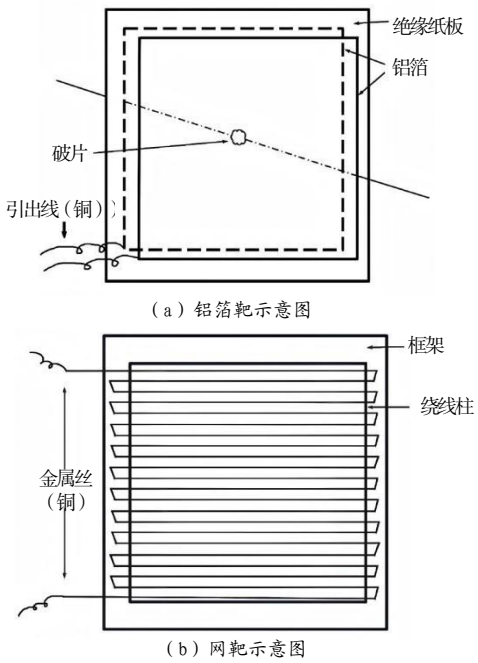
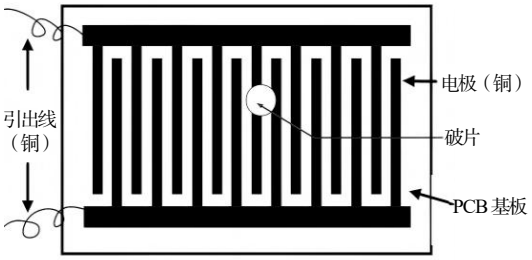


图 2　靶网测速技术试验场地布置示意图

Fig.2　Schematic diagram of the layout of the test site for target network speed measurement technology





（c）梳状靶示意图

图 3 靶网结构示意图

Fig.3 Layout of target network velocity measurement test site

靶网测速技术因其操作简便、成本低廉且能同步获取破片初速 v_0 与速度衰减系数 α 等关键参数，已成为破片速度测量领域的主流方法。通过在战斗部周向多角度布设靶网阵列，该技术不仅能实现速度测量，还可捕获破片空间分布信息，实现多参数一体化测量。

不过，仍存在以下局限性：在破片群测量上，无法精确区分群内个体破片速度；测量精度方面，易受爆炸电磁场干扰，且靶网阻碍导致所测速度为平均值而非瞬时值；多参数同步测量依赖人工检靶，效率低且难以精准关联破片位置与速度；数据采集设备方面，破片可能损坏线路致数据丢失，测点多、线路繁杂对设备要求高；靶网材料不可重复使用，试验准备耗时。

针对这些问题，提出了多项改进措施：（1）在破片群测量上，王高等[5]提出电阻网靶法，可同步测量多破片速度并估算尺寸；徐树茂等[6]发展广义点匹配算法，提升群目标关联精度测量。（2）精度提升方面，Cui X D 等[7]采用柔性聚合物薄膜替代刚性靶板，减小对破片运动的扰动；马竹新等[8]结合双隔离电源与光纤触发，有效抑制电磁干扰。（3）多参数同步测量领域，美国物理科技公司研发的 FRAT 系统[9]以及张中凯[10]研制的经纬测速靶均实现了速度与撞击坐标的高精度同步记录。（4）数据采集装置改进方面，申景田等[11]集成单片机于梳状靶，提升数据准确性；刘晓琦[12]设计 13 通道现场记录仪；褚佳乐等[13]开发无线采集装置，解决断线与布设难题。靶网材料改进方面，郜凡等[14]与李楚[15]分别基于银浆印刷和柔性聚酯薄膜开发轻质可弯折梳状靶；Shamal L C 等[16]提出的导体－绝缘体－导体（CIC）靶则兼具低成本与易部署优势。

2 光测技术

光测技术主要包括天幕靶、光幕靶和高速摄影法。其非接触、高精度、可重复使用及破片群多参数同步测量能力，使其在破片测试领域的应用愈加广泛[17]。天幕靶依赖天空光源，精度受天气的影响较大，在破片测速领域已逐渐被光幕靶所取代。本节重点介绍光幕靶和高速摄影测速技术。

2.1 光幕靶测速技术

光幕靶基于光电转换原理，常用激光器或 LED 作为光源。测速系统通常由 2 台光幕靶和 1 台测时仪组成，采用区截测速原理：破片飞过探测面时遮光引起光通量变化，光电转换电路放大输出电信号，测时仪记录信号时间差，结合靶距计算飞行速度。光幕靶测速系统组成如图 4 所示。

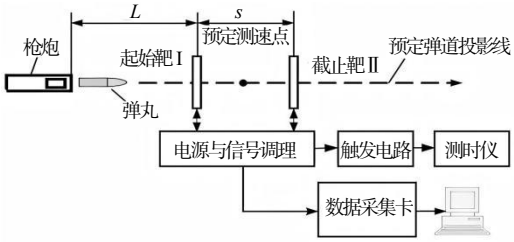


图 4 光幕靶测速系统示意图[18]

Fig.4 Light screen target velocity measurement system diagram

但是实际试验过程中，破片常常斜着穿过两个光幕，需要在测试系统中加入定向靶，对测得的速度进行修正，具体原理示意图如图 5 所示。

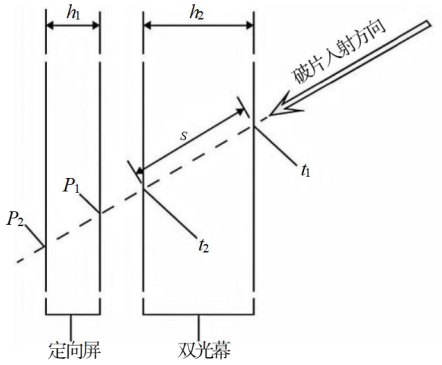


图 5 修正之后的光幕靶测速示意图[19]

Fig.5 Corrected light curtain target velocity measurement diagram

通过记录破片在两定向屏上的穿孔坐标 $P_1(x_1,y_1)$，$P_2(x_2, y_2)$及屏间距 h_1、光幕间距 h_2，可计算实际飞行

距离 S，进而得平均速度 $v=S/t$。此修正法适用于所有区截测速技术。

$$S=\frac{h_2}{h_1}\sqrt{(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2} \qquad (6)$$

光幕靶采用人工光源，不受自然条件限制，灵敏度和精度高，操作简便，在国内靶场应用广泛[20]。其主要局限在于[21]：（1）破片群测量方面，多破片飞过时无法匹配个体，仅能测平均速度。（2）测量精度方面易受爆炸火光、烟雾干扰；飞虫等可能导致误触发。（3）多参数测量方面，主要用于测速，对飞散特性、质量等研究较少。（4）测量装置方面，测试范围有限（大角度飞散可能超出）；不便拆装；激光器能耗大需稳定供电。

针对上述局限，代表性改进包括：（1）破片群测量方面，武江鹏等[22]设计基于 4 个线阵 TDI-CCD 相机的三空间靶面结构，结合时间差与速度约束，实现多发弹丸着靶参数精确测量。（2）精度提升方面，Chu W B 等[23]提出高速阴影成像法解决光电响应不一致导致的偏差；许健男[24]利用相关性原理滤除火光干扰；栾永超等[25]提出基于破片特征波形的过靶时刻提取算法抑制烟雾干扰。（3）多参数测量方面，谭林秋等[26]设计双 N 型六光幕立靶，同步测量弹丸速度与飞行方向。（4）测量设备改进方面，Kalonia R C 等[27]结合激光器与棱镜产生均匀光幕；宁超[28]设计便携式光幕靶降低能耗；Zhao D 等[29]用反光膜替代镜面反射系统简化光路，降低了成本。

2.2　高速摄影测速技术

高速摄影技术可测量破片速度和飞散角，分为间接摄影法和直接摄影法。间接摄影法类似定距测时，据起爆至碰靶时间与距离求取破片速度。直接摄影法通过拍摄飞散过程，经图像处理得轨迹与速度。高速摄影法具体的装置示意图如图 6 所示。该技术因高精度、适用范围广、非接触及多破片多参数同步测量能力，应用日益广泛。例如，美国桑迪亚国家实验室[30]早在 2001 年即用于测试破片速度，测速范围可达 1 到 900 m・s^{-1}，其摄影装置如图 7 所示；刘振扬等[31]利用高速摄影技术对 PTFE/Al 活性破片碰撞三层间隔靶的冲击响应行为展开了研究。

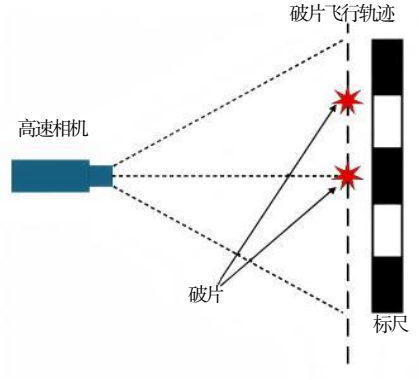


图 6　高速摄影法测速示意图[32]

Fig.6　High-speed photography speed measurement diagram

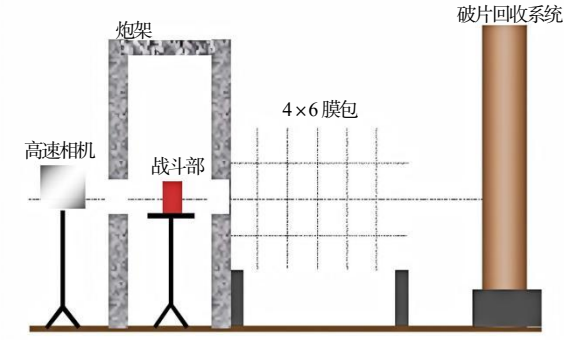


图 7　美国桑地亚国家实验室高速摄影装置[30]

Fig.7　Sandia national laboratories high-speed photography equipment

高速摄影测速技术的缺点也十分明显[33-34]：（1）在测量精度方面，爆炸火光、灰尘干扰图像质量；标尺精度直接影响测量结果。（2）在破片群测量方面，图像数据庞大，处理复杂，需依赖图像识别获取个体参数。（3）在多参数同步测量方面，可同步测速与飞散特性，但破片质量测量仍存瓶颈。（4）在测量设备方面，　成本高昂、易损、环境要求高、存储需求大。

针对以上问题，研究者进行了各种各样的改进。（1）在测量精度提升方面：荷兰 TNO 实验室[35]、美国桑迪亚实验室[36]结合闪光 X 射线穿透火球烟尘成像；Liu Z H 等[37]利用激光照明抑制火光，结合双目交汇算法获取轨迹。（2）在图像识别方面：Torch 技术公司[38]研发基于机器视觉的智能系统（破片捕捉率>80%，精度>95%）；雷江波等[39]应用快速卷积神经网络（Faster-RCNN）检测破片群（准确率 96%）；

许升等[40]改进 Faster-RCNN 网络结合卡尔曼滤波预测破片位置，构建时空关联模型；Watson E 等[41]结合激光片与高速摄影，利用形态学操作与 RANSAC 算法追踪单个破片（最高测速 3 200 m・s^{-1}）。

3 新型破片测速技术

随着科学技术的不断进步，其他领域的测速技术正逐步应用于破片测速领域，其中多普勒雷达测速技术是典型代表。多普勒雷达测速技术是基于多普勒效应的一种非接触的测量方法，基本原理如图 8 所示。

图 8 多普勒雷达测速法基本原理示意图[42]

Fig.8 Schematic diagram of the basic principle of Doppler radar velocity measurement

该方法使用雷达天线向飞行的破片发射某一固定频率的微波，反射波与发射波之间因破片运动产生频差（多普勒频移），通过测量该频移即可推算出破片速度。该技术已得到实际应用与验证。例如，美国陆军阿伯丁试验场[43]就采用多普勒雷达获取过战斗部动爆破片速度，其实验原理图如图 9 所示。

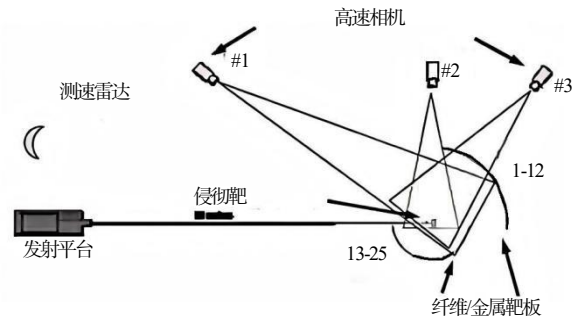


图 9 阿伯丁试验场战斗部动爆破片测试原理示意图[43]

Fig.9 Aberdeen proving ground warhead dynamic fragmentation test schematic diagram

Pawel Sweklej 等[44]将多普勒雷达测速技术和传统的靶网测速技术进行对比，证实了多普勒雷达测速技术在精度和数据丰富性上的优势；袁硕等[45]采用多普勒雷达测速技术实时获取了破片飞行数据，为不同形状预制钨合金破片的速度衰减规律研究提供了关键支持。

多普勒雷达测速技术具有显著优势：（1）非接触式测量，不受爆炸冲击波和破片破坏影响。（2）高精度与实时性，可实时、全程监测破片飞行速度变化。（3）操作简便，响应快速， 适用范围广，支持远距离测量。

然而，该技术也存在明显局限：（1）环境干扰，易受周边金属物体干扰。（2）方向敏感性，对测量角度要求较高，方向性限制大。（3）多目标测量瓶颈，在多破片、多参数同步测量方面能力有限。（4）信号与成本问题，过靶信号信噪比低，且设备成本高昂。

4 总结与展望

本文系统梳理了电测与光测两大技术路径下的主流破片测速方法。随着精确毁伤技术的不断发展，对破片测速技术在多目标、多参数、高精度及抗干扰能力等方面提出了前所未有的挑战。各类技术虽原理迥异、各有侧重，但其演进均围绕上述核心需求展开。

为清晰呈现各技术特点，现将其主要优势、适用场景及固有局限对比如表 1 所示。

表 1 主流破片测速技术对比

Tab.1 Comparison of mainstream fragment velocity measurement technologies

测速技术	核心优势	应用场景	技术局限
靶网测速技术	低成本、安装便捷、多参数测量	大面积、多参数初步评估	精度受限、破片群个体匹配困难、靶网不可复用
光幕靶测速技术	高精度、非接触测量	靶场单目标/小群破片精确测速	环境光敏感、多破片匹配能力弱、测试范围有限
高速摄影技术	高时空分辨率、同步获取速度与空间分布参数	局部区域破片群飞行参数精确测量	数据处理复杂、环境要求苛刻
多普勒雷达技术	远距离实时全程监测、抗爆炸干扰	动态破片运动轨迹追踪	多破片信号混叠、方向敏感性高、设备成本高

表 1 表明，尽管这些技术在特定场景下发挥了重要作用，但面对精确毁伤的需求，其在破片群个体识别、多参数同步测量及高精度获取等方面仍面临共同挑战。

为突破上述瓶颈，推动破片测速技术发展，未来研究可重点聚焦于以下方向：

（1）多目标匹配与轨迹关联。针对破片群个体速度匹配难题，应研发基于时空关联的多目标匹配算法。通过融合破片时间序列与空间位置信息，利用图论或概率数据关联技术构建轨迹约束模型，实现破片在多个探测截面间的身份精确匹配，从而解算出群内各破片的独立速度。

（2）过靶信号深度特征挖掘。突破靶网与光幕靶信号仅作为“过靶/未过靶”开关量的局限，需深度融合机器学习方法。构建基于过靶波形的回归模型，深度提取信号特征，建立波形多维特征与破片飞行参数（如空间分布、尺寸等）的映射关系，实现从单一时间测量到多维参量同步测量的跨越。

（3）多源数据融合与抗干扰技术。为提升测量精度与抗干扰能力，应融合多领域探测技术，优化数据链路。例如，在高速摄影中引入日盲紫外、可见光与红外多谱段联合成像，通过独立处理各波段数据，可有效抑制爆炸火光与烟尘干扰，显著提升复杂环境下的破片识别与追踪能力。

参考文献：

[1] 李丽萍, 孔德仁, 易春林, 等. 战斗部破片速度测量方法综述[J]. 测控技术 ,2014,(11): 5-7,13.

[2] 崔旭超. 基于间歇式激光高速摄影的破片多参量测试技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2023.

[3] 王点兵. 面向静爆破片的现场速度测量装置设计[D]. 太原: 中北大学, 2023.

[4] 易春林, 赵传荣, 周岚, 等. 区截测速系统校准及测量不确定度的评定方法[J]. 弹箭与制导学报, 2015(5): 181-183.

[5] 王高, 尹国鑫, 李仰军, 等. 电阻网靶破片群速度测量方法[J]. 探测与控制学报, 2011(3): 47-50, 55.

[6] 徐树茂, 高俊钗, 桑晓月, 等. 破片群测速过程点匹配算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(11): 26-29.

[7] Cui X D, Xu Y L, Zhang Y L, et al. The ammunition projectile test and evaluation used polymer flexible film sensors system design and application[J]. Journal of Sensors, 2024(1): 1-19.

[8] 马竹新, 王代华, 张瑞刚,等. 基于可变阻抗靶网的多通道破片测速系统[J]. 现代电子技术, 2022, 45(11): 83-87.

[9] Barnard, R, Nebolsine P. Fragment-field analysis testing system[C]//Second Biennial AIAA Weapon System Effectiveness Conference, 2001.

[10] 张中凯. 基于 FPGA 的破片多参数测试系统研究[D].太原: 中北大学, 2022.

[11] 申景田, 苏健军, 姬建荣, 等. 一种测量破片群着靶位置和时间的装置[J]. 宇航计测技术, 2019, 39(201): 86-90.

[12] 刘晓琦. 弹丸爆炸破片速度测试系统的设计与应用[D].太原: 中北大学, 2021.

[13] 褚佳乐, 梁振刚, 赵蒙, 等.无线分布式战斗部破片初速测试系统的设计[J]. 装备制造技术, 2024(7): 156-160.

[14] 郜凡, 颜伟, 褚文博, 等.基于Autodyn靶材优化的新型梳状靶破片测试技术[J].舰船电子工程,2023,43(3): 156-161,192.

[15] 李楚. 基于梳状靶的爆炸破片分布与速度研究[D]. 西安: 西安工业大学,2022.

[16] Shamal L C, Solomon B, Prashant S A. High speed projectile sensor: design, development and system engineering[J]. IEEE Sensors Journal,2021,21(23): 27 062-27 068.

[17] 刘璞, 陈果, 郑晨皓. 战斗部破片光电测速系统设计[J].计算机测量与控制, 2024,32(5): 163-171.

[18] 陈兴旺.大口径弹丸光幕靶测速技术[J]. 四川兵工学报, 2012(12): 7-10.

[19] 禄晓飞, 易成龙, 邹卫科, 等. 光幕靶破片速度测量方法及误差分析[J]. 现代防御技术,2021,49(1): 84-90.

[20] 唐孝容, 张蓉, 虞德水, 等. 用于小破片群测量的光幕靶测试技术[J]. 高压物理学报, 2014, 28(1):103-107.

[21] 丁伟杰, 张学松, 李仰军. 激光测速仪速度算法改进研究[J].火力与指挥控制,2018,43(9):169-173.

[22] 武江鹏, 宋萍, 郝创博, 等. 带弹序的弹幕武器立靶密集度测试[J].光学精密工程,2016,24(3):600-608.

[23] Chu W B, Zhao D G, Liu B W, et al. Research on target deviation measurement of projectile based on shadow imaging method in laser screen velocity measuring system[J].Sensors, 2020,20(2): 554.

[24] 许健男. 调制型抗火光干扰光幕靶设计[D]. 西安: 西安工业大学,2024.

[25] 栾永超, 张斌, 李宸凯, 等. 强烟雾干扰下的枪口子弹初速测量方法[J].兵工学报, 2025,46(3): 191-201.

[26] 谭林秋, 王佳, 张杭, 等. 双 N 型六光幕阵列弹丸斜入射速度测量方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2023,43(2): 20-25.

[27] Kalonia R C, Gautam M, Amod K, et al. Laser-based projectile speed measurement system[J]. Optical Engineering,2007,46(4): 044 303.

[28] 宁超.便携式测速光幕靶设计[D].西安:西安工业大学, 2024.

[29] Zhao D, Zhou H, Liu J, et al. High-precision velocity measuring system for projectiles based on retroreflective laser screen[J].Optik: Zeitschrift fur Lichtund Elektronenoptik: Journal for Light-and Electronoptic,2013,124(6): 544-548.

[30] Chhabildas L, Reinhart W, Wilson L T, et al. Fragmentation properties of AerMet 100 steel in two material conditions [C]//Proceedings 19th international symposium on ballistics interlaken, Switzerland, May. 2001: 7-11.

[31] 刘振扬, 卢冠成, 胡蝶, 等. PTFE/Al 活性破片碰撞三层间隔靶冲击响应行为[J].北京理工大学学报,2023,43(10): 1 068-1 077.

[32] 杨晟,邓峰,严岩. 基于工业相机的枪弹测速系统[J]. 甘肃科技,2024,40(6): 25-29.

[33] 焦志刚, 杜宁, 范龙刚, 等. 弹丸脱靶量及速度测量的高速摄影试验[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(11):191-194.

[34] 焦志刚, 杜宁, 贺玉民, 等. EFP 速度测量的高速摄影试验研究[J].火力与指挥控制, 2018,43(6):180-183.

[35] Resnyansky A D, Wildegger-Gaissmaier A E, Katselis G. Directional fragmentation warheads: a theoretical and experimental investigation[C]//Proc. 18th Int. Symposium on Ballistics, William G. Reinecke (Ed.). 1999: 543-550.

[36] SANDIA National Laboratories. Fragment tracking: Insights into what happens in explosions [EB/OL]. ScienceDaily, 2016- 10-12. https://www.sciencedaily.com/releases/2016/10/161012122105.htm.

[37] Liu Z H, Luo H G, Gu J L. Researches on projectile muzzle velocity measurement system based on high-speed camera binocular intersection measurement and laser illumination[J]. Journal of Physics:Conference Series,2024,2 891(13): 132 015.

[38] Burke J, Olson E, Shoemaker G. Stereo camera optical tracker[C]//Proceedings of the ITEA Las Vegas Instrumentation Conference, Las Vegas, NV, USA. 2016: 10-12.

[39] 雷江波, 王泽民, 李静.基于 Faster R-CNN 的破片群图像目标检测研究[J]. 国外电子测量技术,2021,40(1): 70-74.

[40] 许升. 基于视觉的战斗部破片参数测量研究[D].西安:西安工业大学,2022.

[41] Watson E, Gulde M, Hiermaier S. Fragment tracking in hypervelocity impact experiments[J]. Procedia engineering, 2017(204): 170-177.

[42] 张建宏，武锦辉，刘吉，等. 基于 FPGA 的多普勒雷达测速系统[J]. 国外电子测量技术,2019,38(12): 72-75.

[43] Angel J. Methodology for dynamic characterization of fragmenting warheads[M]. Army Research Laboratory, 2009.

[44] Sweklej P, Wasilewski A, Magier M. Radar method of measuring the velocity of the fragments[J]. Sustainability, 2023, 15(2): 951.

[45] 袁硕，赵东志，程春，等.高速钨合金破片速度衰减规律试验研究[J].弹道学报,2025,37(1):77-84.