

文章编号: 1671-7449(2026)02-0240-08

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(2): 240-247.

EFP爆炸场分时复用测试技术

杜秀昊¹, 高九萍², 王 高^{1*}, 梁海坚³, 孙 鹏¹, 王彬翰¹, 董晓航¹, 周汉昌¹

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051; 2. 山西风雷钻具有限公司, 山西 侯马 043000;

3. 中北大学 软件学院, 山西 太原 030051)

摘 要: 针对爆炸成型弹丸(Explosively Formed Projectile, EFP)爆炸过程中温度变化剧烈、持续时间短、测量困难等问题, 提出了基于两台红外热像仪的分时复用测试技术对EFP爆炸过程进行测试, 解决了红外热像仪受帧频限制无法捕捉爆炸瞬间完整温度信息的问题。通过高精度同步触发器对两台红外热像仪进行同步触发和时序控制, 使两台红外热像仪之间的帧率有10 μ s延迟, 从而实现了高帧频拍摄, 获取了EFP爆炸瞬间的表面温度分布。试验中测得EFP爆炸后的最高温度分别为2 073.72、1 779.74、1 910.87和2 082.56 $^{\circ}$ C, 最大偏差为14.1%, 火球的直径分别为3.64、3.61、3.80和3.90 m, 最大偏差为6.7%。此外, 试验还分析了EFP的形态变化和飞行速度, 第一发EFP的飞行速度为2 000 m/s, 第二发EFP的飞行速度为2 200 m/s。

关键词: 爆炸场; 爆炸成型弹丸; 红外热像仪; 瞬态温度; 热辐射; 分时复用

中图分类号: TN215 文献标识码: A DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026026

引用格式: 杜秀昊, 高九萍, 王高, 等. EFP爆炸场分时复用测试技术[J]. 测试技术学报, 2026, 40(2): 240-247.

DU Xiuhao, GAO Jiuping, WANG Gao, et al. Time division multiplexing test technology of EFP explosion field[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(2): 240-247.

Time Division Multiplexing Test Technology of EFP Explosion Field

DU Xiuhao¹, GAO Jiuping², WANG Gao^{1*}, LIANG Haijian³, SUN Peng¹, WANG Binhan¹,

DONG Xiaohang¹, ZHOU Hanchang¹

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Fenglei Drilling Tools Co., Ltd., Houma 043000, China;

3. School of Software, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In response to the issues of significant temperature fluctuations, short duration, and measurement difficulties during the explosion process of explosively formed projectile (EFP), a time division multiplexing temperature measurement method based on two infrared thermal imaging cameras is proposed to test the explosion process of EFP, which solves the problem that the infrared thermal imaging camera could not capture the complete temperature information at the moment of explosion due to the limitation of frame rate. By employing a high-precision synchronous trigger for synchronous trigger and timing control

【收稿日期】2025-03-18

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(62403440); 航空科学基金资助项目(202300340U0002)

【作者简介】杜秀昊(2000—), 男, 硕士生, 主要从事红外热像仪爆炸场瞬态高温测试技术研究。E-mail: 1850816407@qq.com。

*【通信作者】王 高(1973—), 男, 教授, 博士, 主要从事温度、速度、压力等物理信息探测与处理和武器弹药毁伤效能评估等技术研究。E-mail: 917978149@qq.com。

of the two infrared thermal cameras, a frame rate delay of 10 μs between the two cameras is achieved, enabling high frame rate shooting and obtaining the surface temperature distribution at the moment of the EFP explosion. In the test, the maximum temperature after the EFP explosion are 2 073.72, 1 779.74, 1 910.87 and 2 082.56 $^{\circ}\text{C}$, with a maximum deviation of 14.1%, and the diameter of the fireball are 3.64, 3.61, 3.80 and 3.90 m, respectively, with a maximum deviation of 6.7%. In addition, the morphological changes and flight speed of the EFP are analyzed, with the flight speed of the first EFP being 2 000 m/s and the second being 2 200 m/s.

Key words: explosion field; explosively formed projectile(EFP); thermal imaging cameras; transient temperature; thermal radiation; time division multiplexing

0 引言

爆炸成型弹丸(Explosively Formed Projectile, EFP)战斗部技术是聚能装药技术的一个分支,作为一种高效的反坦克武器,广泛应用于现代军事武器系统中^[1-3]。它通过爆炸的能量形成高速金属射流,速度可达到 1 500~3 000 m/s,能够穿透现代坦克和装甲车的防护系统,对目标造成极大破坏,威力不容小觑,在现代战争中具有重要的战略意义^[4-6]。

高温测试技术是评估爆炸热毁伤效应的手段,尤其对于 EFP 爆炸等瞬态高温过程,传统测温方法面临严峻挑战。根据测量原理,现有高温测试方法分为接触式测温技术和非接触式辐射测温技术,接触式测温技术包括热电偶测温法、光纤测温法和超声测温法等。Seebeck 效应是热电偶测温的基础原理,其适用温度上限为 1 800 $^{\circ}\text{C}$,但在爆炸冲击环境下易出现信号延迟与结构损毁。Bonilla 等^[7]发现爆炸产生的冲击波会使热电偶信号失真并产生较大的误差。光纤测温法利用荧光寿命衰减特性或拉曼散射特性等相关原理,耐高温上限达到 2 500 $^{\circ}\text{C}$ 。王涛等^[8]研究了稀土倍半氧化物单晶光纤,实测量工作温度在 2 000~2 500 $^{\circ}\text{C}$,适用于航空发动机燃烧室和固体火箭推进器等高温场的测试。超声测温法通过声速-温度相关性原理进行测试,适用于熔融金属等均匀介质。Groz 等^[9]指出超声测温对非均匀爆炸产物适应性差,并且更容易受到冲击波的干扰。非接触式辐射测温技术包括多光谱辐射法、激光干涉法和红外热成像法等。多光谱辐射法的原理是通过采集目标多个波段辐射能,再经过普朗克定律对温度进行反演。Yang 等^[10]将多光谱辐射测温不确定度降至 $\pm 0.5\%$ ($T > 1\,500\,^{\circ}\text{C}$),但需预先

知道材料发射率光谱特性。激光干涉法利用高温气体折射率的变化对温度场进行测量。Yang 等^[11]成功将此方法应用于火箭动机喷流测试中,但产生的烟尘会严重衰减激光信号。红外热成像法通过面阵探测器获取表面温度场,具有高空间分辨率和较快帧频等优点。Blankenhagel 等^[12]将红外测温成功应用于化学爆炸火球的温度场重建。

虽然红外热成像技术在爆炸场测温中有着明显的优势,但对于 EFP 类拥有较高爆速爆炸过程的测试仍面临两大问题:一方面是帧频不足,单台设备最高帧频仅能覆盖爆炸中后期,无法分析 EFP 初始成型瞬间的温度场演化;另一方面是同步缺失,多台设备协同需解决微秒级触发同步的问题,否则数据难以时空对齐。

为解决上述问题,本文首次提出分时复用双红外热像仪测温架构,通过高精度同步触发器协调双机采集时序,提高了拍摄帧频,填补了 EFP 爆炸初期温度场数据空白,对武器系统的爆炸热毁伤能力评估提供了新的研究思路。

1 辐射测温原理及误差分析

1.1 红外热像仪测温原理

红外热像仪测温原理是通过被测物体的红外辐射确定该物体的辐射温度,获得的是物体表面温度,又称表观温度。物体本身温度越高,其向外辐射红外线的能力越强^[13]。红外辐射能量分布遵循普朗克黑体辐射定律,其峰值波长与温度成反比。由于实际红外热像仪仅能捕捉特定工作波段内的辐射能量,无法覆盖全波段辐射,因此,测量结果本质上是表观辐射温度,需通过波段标定和发射率修正逼近真实温度^[14-15]。对于爆炸产生的火球来说,它所散发的红外辐射和其本身的温度存在着一定关系。当红外热像仪工作时,首

先,对红外辐射的能量信息进行读取,其次,将读取的能量信息转化为电信号,该信号强度取决于探测器在特定波段的光谱响应度,再通过辐射定律将其转化为温度值,最终,通过计算处理将包含温度信息的红外图像显示到计算机上。本试验

采用3~5 μm 波段,此波段大气透射率高,且避开了 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 强吸收带,可减少环境干扰^[16]。热像仪通过黑体标定建立波段内辐射能量与温度的映射关系,确保工作波段内辐射能量-温度转换的准确性^[17]。其原理如图1所示。

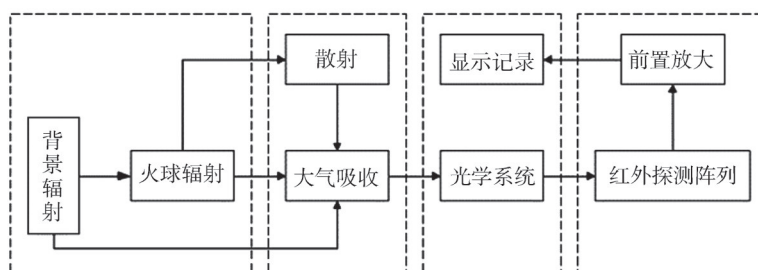


图1 红外辐射测温原理图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared radiation temperature measurement

红外热像仪对EFP爆炸场进行温度测量时,接收的辐射主要有被测目标物体的辐射、大气辐射和背景辐射3个部分,其测温数学表达式为

$$f(T'_0) = \tau_a [\epsilon f(T_0) + (1 - \alpha) f(T_u)] + \epsilon_a f(T_a), \quad (1)$$

式中: T'_0 为红外热像仪获取的温度; τ_a 为大气透射率; ϵ 为爆炸火球的发射率; T_0 为火球表面的真实温度; α 为火球表面的吸收率; T_u 为测试环境温度; ϵ_a 为大气的发射率; T_a 为大气温度,以上温度单位均为 $^{\circ}\text{C}$ ^[18]。

通过红外热像仪对黑体响应曲线进行拟合,从而获取内部探测器的光谱响应度是随波长的变化而变化,数学关系为

$$f(T) = CT^n, \quad (2)$$

式中: C 为红外热像仪工作波段的相关常数; n 为探测器工作材料和波段的相关常数。此次试验选用3~5 μm 波段范围的碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride, MCT)探测器, n 为5.33, C 为 2.9259×10^{-12} ,将式(2)代入式(1)可以得到目标真实温度数学表达式为

$$T_0 = \left\{ \frac{1}{\epsilon} \left[\frac{1}{\tau_a} T'_0 - (1 - \alpha) T_u - \frac{\epsilon_a}{\tau_a} T_a \right] \right\}^{\frac{1}{n}}, \quad (3)$$

式中: T_0 为真实温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。通过相应的数据计算可以得到爆炸火球表面的真实温度。

1.2 误差分析

1.2.1 红外热像仪辐射标定

红外热像仪测量到的不是物体真实温度,而是物体本身辐射分布,所以要进行辐射标定,建立红

外热像仪输出信号和物体辐射值之间的关系。黑体辐射源标定法是标准方法之一,通过已知温度和辐射特性的黑体辐射源校准红外热像仪的测温精度。本实验使用型号为LS3000-100-D的标准黑体炉对红外热像仪进行定标,如图2所示,通过重复进行定标试验使得测温数据更为精确。



图2 红外热像仪-黑体炉标定现场

Fig. 2 Calibration site of infrared thermal imager-blackbody furnace

1.2.2 辐射源发射率 ϵ 确定

发射率 ϵ 的确定一直都是国内外学者研究的难点和重点,其测量的准确与否会对测温精度产生重要影响。本次爆炸产生的辐射源主要由高温的非金属和金属氧化物组成,爆炸火球可以近似为灰体模型,在热像仪工作波段的发射率取经验值 $\epsilon=0.80$ ^[19]。

1.2.3 误差分析装置

使用型号BF-1000激光测距仪精准测量红外热像仪到爆心的距离,测量范围为0.05~200 m,误差为 $\pm 1 \text{ mm}$; VC261型高精度温湿度计测量试验现场的温湿度,温度误差 $\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度误差

±3 RH。将以上不确定因素测量得到精确数据,最大程度地减少了误差。

2 试验部分

2.1 试验方案

试验使用两台型号为 TELOPS FAST M200 的红外热像仪,利用分时复用的测温方法对 EFP 爆炸瞬间的温度信息进行采集,使拍摄获取的温度信息更为精细和完整。使用高精度同步触发器对两台红外热像仪进行同步触发和时序控制,使两台相机之间的帧率有 10 μ s 延迟。测温系统搭建如图 3 所示。



图 3 测温系统的搭建

Fig. 3 Construction of temperature measurement system

两台红外热像仪的参数设置一致,如表 1 所示。

表 1 红外热像仪参数

Tab. 1 Parameters of thermal imaging camera

分辨率/pixel	帧频/Hz	积分时间/ μ s	焦距/mm	光谱范围/ μ m
320×100	1000	10	100	3~5

2.2 分时复用测温方法

红外热像仪的帧频有限会导致拍摄结果不完整。为了能够有效评估 EFP 爆炸后的热毁伤效应,创新性地提出了基于两台红外热像仪的分时复用测温方法,拍摄 EFP 的爆炸过程,获取其爆炸火球更为完整有效的表面温度信息。

EFP 爆炸后的第一阶段持续时间极短(仅有几微秒),火球表面温度下降很快,从第一帧到第二帧之间,单台红外热像仪所拍下的温度信息量有限,故采用两台红外热像仪进行分时拍摄,使两台红外热像仪之间的帧率有 10 μ s 延迟,且两台相机的曝光时间均处于 EFP 爆炸过程中,将红外热像仪的帧频上限提高了一倍,把爆炸过程图像

进行时间细化,对 EFP 爆炸瞬间的研究更加深入,其原理如图 4 所示。

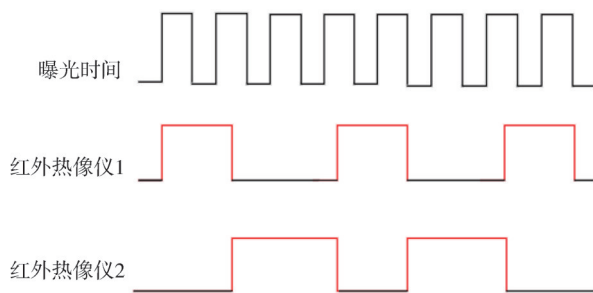


图 4 分时复用原理

Fig. 4 Principle of time division multiplexing

图 4 中第一条曝光时间曲线代表 EFP 爆炸的整个过程,而后两个曲线的红色凸起分别代表两台红外热像仪拍摄时间。通过分时复用的测温方法将两台红外热像仪的拍摄时间覆盖整个爆炸后的曝光时间,将爆炸瞬间的温度场拍摄得更为完整。

2.3 现场布局

EFP 弹体放置在木制靶架上,弹体距地面高度 1.5 m,在弹体右侧 0.2 m 处放置装甲钢靶,两台红外热像仪放置在距离弹体 50 m 处的掩体内,通过导线与高精度触发器相连接,最后通过网线传输到电脑端,实现了对数据的采集、传输与保存。现场布局如图 5 所示。

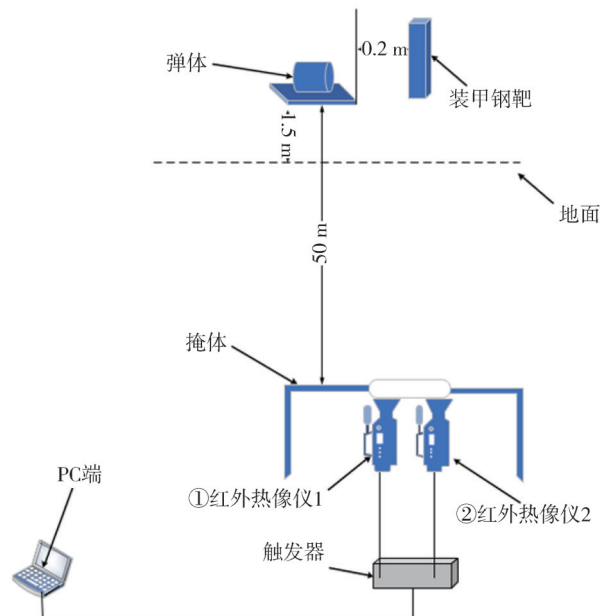


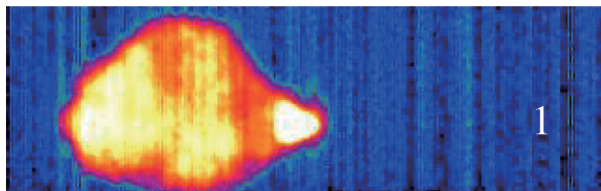
图 5 现场布局图

Fig. 5 Site layout

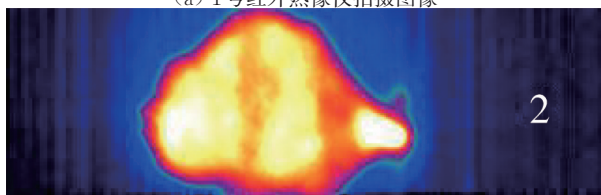
3 试验结果及分析

3.1 温度测试结果

两台红外热像仪记录了两发EFP爆炸的过程,拍摄到的红外图像如图6,图7所示。



(a) 1号红外热像仪拍摄图像



(b) 2号红外热像仪拍摄图像

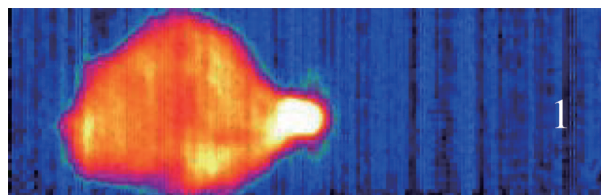
图6 第一发EFP红外图像

Fig. 6 The first EFP infrared image

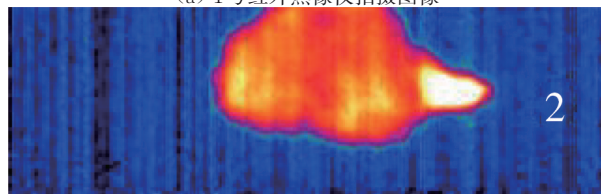
对EFP爆炸过程拍摄结束后,在红外热像仪软件Reveal IR中设置修正后的发射率等相关参数,得到EFP弹体成型过程中4帧红外图像的最高温度信息如表2所示。

EFP爆炸的温度范围在1 779.74~2 082.56℃之间,第一发最高温度偏差为14.1%,第二发最高温度偏差为8.2%,可以推断出EFP在爆炸后较短

的时间内温度变化十分迅速。



(a) 1号红外热像仪拍摄图像



(b) 2号红外热像仪拍摄图像

图7 第二发EFP红外图像

Fig. 7 The second EFP infrared image

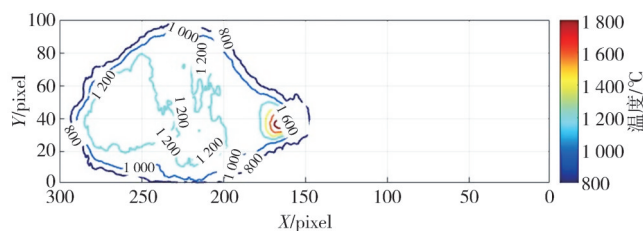
表2 EFP爆炸最高温度

Tab. 2 EFP explosion maximum temperature

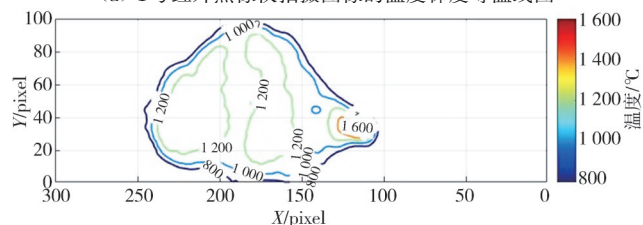
	第一发		第二发	
热像仪机号	1	2	1	2
温度/℃	2 073.72	1 779.74	1 910.87	2 082.56

对拍摄后的红外图像数据进行处理,通过相关软件绘制得到EFP爆炸火球温度梯度的二维等温线图和三维表面温度分布,分析其温度分布范围和温度分布特性,能够准确地对其热毁伤性能进行评估。

图8和图9为EFP爆炸火球等温线的分布图,图10和图11则为其对应的三维表面温度分布。



(a) 1号红外热像仪拍摄图像的温度梯度等温线图



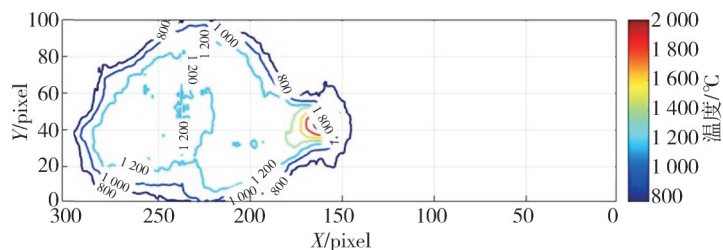
(b) 2号红外热像仪拍摄图像的温度梯度等温线图

图8 第一发EFP温度梯度等温线图

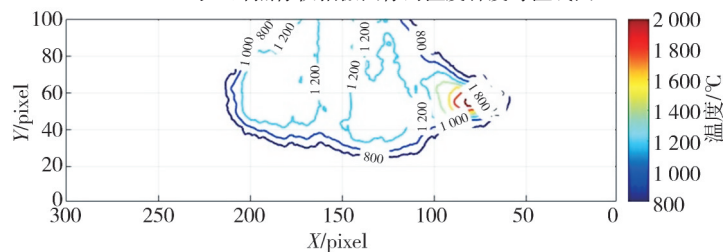
Fig. 8 The first EFP temperature gradient isotherm plot

可以看出EFP的高温区域主要集中在弹头前部附近,其温度能达到2 000℃左右,整个爆炸火球的表面温度范围基本都在1 000℃以上。说明

EFP是通过弹头高温燃烧进行穿甲破坏,且在穿甲的同时对周围的事物进行热毁伤破坏。



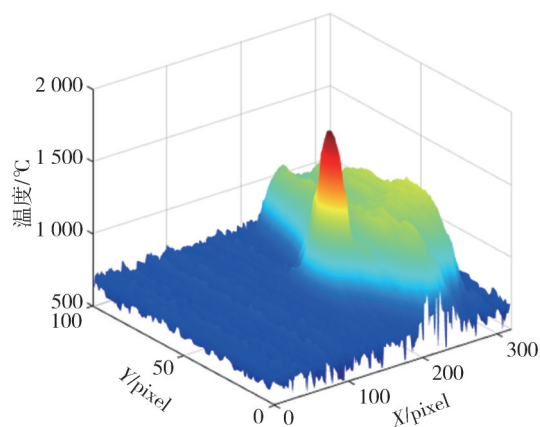
(a) 1号红外热像仪拍摄图像的温度梯度等温线图



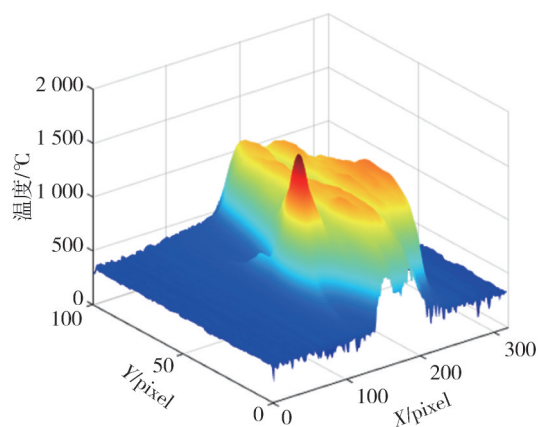
(b) 2号红外热像仪拍摄图像的温度梯度等温线图

图 9 第二发 EFP 温度梯度等温线图

Fig. 9 The second EFP temperature gradient isotherm plot



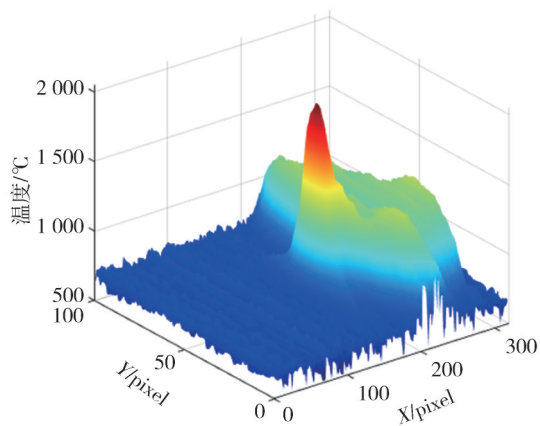
(a) 1号红外热像仪拍摄图像的三维表面温度分布



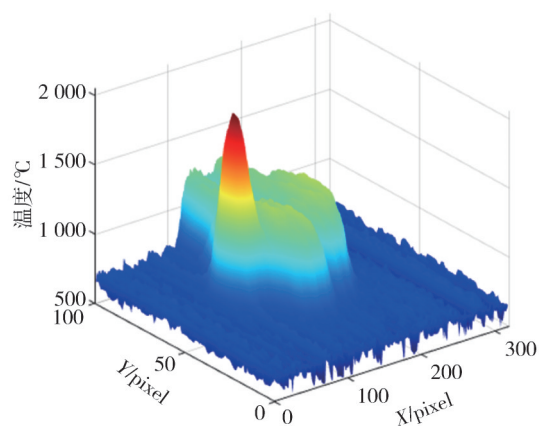
(b) 2号红外热像仪拍摄图像的三维表面温度分布

图 10 第一发 EFP 三维表面温度分布

Fig. 10 Three-dimensional surface temperature distribution of the first EFP



(a) 1号红外热像仪拍摄图像的三维表面温度分布



(b) 2号红外热像仪拍摄图像的三维表面温度分布

图 11 第二发 EFP 三维表面温度分布

Fig. 11 Three-dimensional surface temperature distribution of the second EFP

3.2 毁伤直径、形态、速度测试结果

参考 GJB 5891—2006 爆炸火球测试标准,以温度 $\geq 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区域作为火球有效边界,结合现场实际距离和红外热像仪拍摄的图像像素之间的比例关系,得出对应的比例尺。再经过数据分析处理可以得到 EFP 爆炸火球的直径如表 3 所示。

表 3 EFP 爆炸火球直径
Tab. 3 EFP explosion fireball diameter

	第一发		第二发	
热像仪机号	1	2	1	2
直径/m	3.64	3.61	3.80	3.90

EFP 火球的直径在 3.64~3.90 m 之间,形成的爆炸火球大小较为稳定,火球直径的最大偏差小于 6.7%,能够对目标物体实施更有效的热毁伤破坏。

由图 6 的红外图像可以初步看到 EFP 成型过程中弹体拉长,由图 7 可以看到弹体更为明显的拉长和变尖,所以,使用红外热像仪对 EFP 进行拍摄能够验证其形变过程中的形态变化趋势。

由于两台红外热像仪之间有 10 μs 延迟,通过红外图像中 EFP 在这 10 μs 内的像素差值,再结合与实际距离的比例尺,可推断出第一发 EFP 飞行距离为 20 mm,飞行速度约为 2 000 m/s,第二发 EFP 飞行距离为 22 mm,飞行速度约为 2 200 m/s。

4 结 论

针对 EFP 爆炸过程中温度变化剧烈、持续时间短、测量困难等问题,提出了基于两台红外热像仪的分时复用测温方法,使用高精度同步触发器对两台红外热像仪进行同步触发和时序控制,使两台相机之间的帧率有 10 μs 延迟,提高了红外热像仪的帧频上限,对 EFP 爆炸瞬间进行了更为细致的研究,弥补了红外热像仪由于低帧频限制导致拍摄结果不完整的缺陷。

通过对两发 EFP 爆炸的分时复用拍摄,得到其表面温度分布,结合拍摄数据绘制二维等温线图和三维表面温度分布图,得到 EFP 爆炸过程中最高温度为 2 073.72、1 779.74、1 910.87 和 2 082.56 $^{\circ}\text{C}$,最高温度最大偏差为 14.1% 和 8.2%;火球直径分别为 3.64、3.61、3.80 和 3.90 m,最大偏差为 6.7%,其中最高温度和火球直径的最大偏差均为两发 EFP 之间的差异。由红外图像看出弹体的形变过程有明显的拉长、变尖,通过实际距离与像素之间的比例关系计算出

两发 EFP 的飞行速度为 2 000 m/s 和 2 200 m/s,两发速度参数均在 1 500~3000 m/s 范围内,数据合理有效。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] 贺金金,梁增友,邓德志,等.隔板结构参数对 EFP 成型的影响[J].中北大学学报(自然科学版),2020,41(5):412-417.
HE Jinjin, LIANG Zengyou, DENG Dezhi, et al. EFP forming influenced by structural parameters of diaphragm [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2020, 41(5): 412-417. (in Chinese)
- [2] 李众,郝争辉,王高,等.热像仪聚焦程度对红外辐射检测的影响研究[J].红外技术,2019,41(3):245-250.
LI Zhong, HAO Zhenghui, WANG Gao, et al. Research on the influence of thermal imager focusing degree on infrared radiation detection [J]. Infrared Technology, 2019, 41(3): 245-250. (in Chinese)
- [3] YU H, SUN Y, LIU Y, et al. A novel measurement strategy for explosion temperature field towards enhancing the fire process safety[J]. Fire Safety Journal, 2024, 145: 104118.
- [4] 马旭静,孙鹏,张骏虎,等.温压炸药爆炸瞬态高温测试技术研究[J].计算机测量与控制,2024,32(3):204-210.
MA Xujing, SUN Peng, ZHANG Junhu, et al. Research on transient high-temperature testing technology for the explosion of thermobaric explosives [J]. Computer Measurement & Control, 2024, 32(3): 204-210. (in Chinese)
- [5] JOHNSTON J P, PEREIRA J M, RUGGERI C R, et al. High-speed infrared thermal imaging during ballistic impact of triaxially braided composites[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 52(25): 3549-3562.
- [6] HOBBS M J, BARR A, WOOLFORD S, et al. High-speed infrared radiation thermometer for the investigation of early stage explosive development and fireball expansion[J]. Sensors, 2022, 22(16): 6143.
- [7] BONILLA J M, ÀGÜEDA A, MUÑOZ M A, et al. Thermal radiation model for dynamic fireballs with

- shadowing[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 128: 372-384.
- [8] 王涛, 贾志泰, 李阳, 等. 单晶光纤制备及高温传感器研究进展[J]. *人工晶体学报*, 2021, 50(9): 1603-1624.
- WANG Tao, JIA Zhitao, LI Yang, et al. Research progress on preparation of single crystal fiber and high temperature sensor[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2021, 50(9): 1603-1624. (in Chinese)
- [9] GROZ M M, ABISSET-CHAVANNE E, MEZIANE A, et al. Three-dimensional reconstruction of thermal volumetric sources from surface temperature fields measured by infrared thermography[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(24): 5464.
- [10] YANG Z, XIAO P, DAI J, et al. Research on the calibration method of non-source temperature area of multispectral pyrometer based on a new exponential curve model [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 125: 104291.
- [11] YANG Z, TANG B, QIU Y, et al. Measurement of transient temperature using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) with the surface temperature effect[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2023, 38(10): 1952-1961.
- [12] BLANKENHAGEL P, WEHRSTEDT K D, MISHRA K B, et al. Thermal radiation assessment of fireballs using infrared camera[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, 54: 246-253.
- [13] 李秀丽, 惠君明, 解立峰. 红外热成像技术在云团爆炸测温中的应用[J]. *含能材料*, 2008(3): 344-348.
- LI Xiuli, HUI Junming, XIE Lifeng. Application of infrared thermal imaging technology in cloud explosion temperature measurement [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2008(3): 344-348. (in Chinese)
- [14] AGUDELO A, CORTÉS C. Thermal radiation and the second law[J]. *Energy*, 2010, 35(2): 679-691.
- [15] WEI H, GU J, REN F, et al. Smart materials for dynamic thermal radiation regulation [J]. *Small*, 2021, 17(35): 2100446.
- [16] ROTHMAN L S, GORDON I E, BABIKOV Y, et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 130: 4-50.
- [17] SOSNOWSKI T, KASTEK M, SAWICKI K, et al. High-accuracy calibration method of a thermal camera using two reference blackbodies [J]. *Sensors*, 2024, 24(17): 5831.
- [18] 李文哲, 王高, 魏志芳, 等. 枪弹底火瞬态火焰温度测试及其图像[J]. *含能材料*, 2022, 30(12): 1266-1271.
- LI Wenzhe, WANG Gao, WEI Zhifang, et al. Transient flame temperature test and image of primer of gunshot [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2022, 30(12): 1266-1271. (in Chinese)
- [19] 田培培, 张猛, 王高, 等. 基于红外热像仪的温压弹爆炸温度场测试 [J]. *红外技术*, 2016, 38(3): 260-265.
- TIAN Peipei, ZHANG Meng, WANG Gao, et al. Test of temperature field of temperature and pressure bomb explosion based on infrared thermal imaging[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(3): 260-265. (in Chinese)