

枪口焰烟光学特性测试研究

骆延令 王希骋 王律 高蒙 王曼 程洪亮

Measurement for optical properties of gun flame and smoke

LUO Yanling, WANG Xicheng, WANG Lyu, GAO Meng, WANG Man, CHENG Hongliang

引用本文:

骆延令, 王希骋, 王律, 等. 枪口焰烟光学特性测试研究[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 406–411. DOI: 10.5768/JAO202344.0203007

LUO Yanling, WANG Xicheng, WANG Lyu, et al. Measurement for optical properties of gun flame and smoke[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(2): 406–411. DOI: 10.5768/JAO202344.0203007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0203007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多组分复合薄膜的光学、电学、机械性能及其应用

Optical, electrical and mechanical properties and applications of multicomponent composite films

应用光学. 2020, 41(2): 405–420 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0205005>

K9光学玻璃化学钢化技术研究

Research on chemical strengthening technology for K9 optical glass

应用光学. 2021, 42(1): 188–193 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0105002>

飞秒激光脉冲宽度和脉冲波形测试技术

Research on femto-second laser pulse width and pulse waveform measurement technology

应用光学. 2019, 40(2): 291–299 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0203003>

水下环境光学特性测量方法

Optical properties measurement of underwater environment

应用光学. 2018, 39(1): 83–87 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0103001>

近红外超透镜的设计与制备

Design and fabrication of near-infrared metalens

应用光学. 2021, 42(6): 1102–1106 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0604002>

金催化的硅纳米线的可控制备及光学特性研究

Research on controllable preparation and optical properties of gold catalysed silicon nanowires

应用光学. 2019, 40(5): 738–745 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0501004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 02-0406-06

枪口焰烟光学特性测试研究

骆延令, 王希骋, 王 律, 高 蒙, 王 曼, 程洪亮

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 针对狙击作战中对狙击手的探测、定位及告警的需求, 开展了枪口焰烟光学特性测试研究。根据枪口焰烟文献资料与光学测量设备的性能参数, 设计了枪口焰烟光学特性外场测试详细方案。对某 5.8 mm 与 7.62 mm 口径弹道步枪的枪口焰烟光学特性进行了外场测试。测试结果表明, 枪口焰烟辐射主要集中在 $2\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$, 持续时间约为 6 ms, 辐射能量最大值出现在 2 ms 附近, 5.8 mm 弹道步枪枪口焰烟在中波和长波的辐射强度均高于 7.62 mm。枪口焰烟光学特性的测试结果为枪口焰烟的探测及武器发射药的改进提供了重要依据。

关键词: 枪口焰烟; 光学特性; 测试

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0203007

Measurement for optical properties of gun flame and smoke

LUO Yanling, WANG Xicheng, WANG Lyu, GAO Meng, WANG Man, CHENG Hongliang

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: For requirements of detecting, positioning and warning of sniper in sniping operation, the research of optical properties for gun flame and smoke was developed. According to the documentary data for gun flame and smoke and performance parameters of optical measuring equipment, a detailed field test scheme of optical properties for gun flame and smoke was designed. The optical properties for gun flame and smoke of a 5.8 mm and 7.62 mm caliber ballistic rifle were tested in the field. The test results show that the radiation of gun flame and smoke is mainly concentrated in $2\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$, the duration was approximately 6 ms, the maximum radiation energy appears around 2 ms, and the radiation intensity of gun flame and smoke of 5.8 mm ballistic rifle is higher than 7.62 mm in both medium waves and long waves. The measurement results of optical properties for gun flame and smoke provide an important basis for the detection of gun flame and smoke and the improvement of weapon propellant.

Key words: gun flame and smoke; optical properties; test

引言

在现代维和反恐、城市巷战及丛林山地作战中, 狙击作战具有较高的隐蔽性, 能够有效击杀对方重要人物、毁伤敌方关键设备, 延迟敌方行动, 从而给敌方巨大的心理震慑作用。随着狙击步枪射程、威力和射击精度的提高及狙击手训练有素, 狙击手的威胁日益增加。在射击过程中, 枪口出现大量的火焰和烟雾, 一方面容易暴露射手位置, 危及射手安全, 同时还会影响射手的再瞄准水平; 一方面枪口焰烟也反映出发射药的燃烧性能和能

量利用率, 进一步影响武器的弹道性能。如果作战中在狙击手开枪后我方能够迅速根据枪口焰烟信号, 对敌方狙击手进行定位告警, 可以有效减少我方人员伤亡, 有效减小敌方狙击手的威胁^[1]。兵器 204 所开展了发射药对枪口焰烟影响测量研究, 通过高速摄影 CCD(电荷耦合器件)对 5.8 mm 枪口焰烟综合亮度、焰烟尺寸、持续时间及枪口烟雾透过率等参数进行了测量^[2]。国外报道了狙击枪枪口闪光、迫击炮炮口闪光、手持式火箭筒发射闪光等光谱能量分布主要集中在 $2.8\ \mu\text{m}$ 和 $4.5\ \mu\text{m}$ 附

收稿日期: 2022-04-29; 修回日期: 2023-01-12

基金项目: 国防科技创新特区快速响应支持项目 (20-163-32-ZD-003-001-01);

作者简介: 骆延令 (1983—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事目标光学特性研究。E-mail: 110714575@qq.com

近。澳大利亚国防部的 Jean-Pierre Ardouin 等人在 20 世纪 90 年代中期应用快速扫描遥感红外光谱技术对枪口焰烟的组成进行了测量。南理工王俊德等提出了一种行之有效的枪口火焰光电测量方法^[3]。中国工程物理研究院刘振光等用一款标准的日盲型紫外探测传感器对 6.72 mm 口径 81 式步枪的枪口火焰进行了近距离测试^[4]。国外多项试验结果表明, 轻武器枪口焰烟闪光可以被工作在可见光到红外波段的不同光谱范围内光电系统探测到。根据目前枪口焰烟相关文献资料^[5-6], 测试数据主要集中在可见近红外波段, 在红外波段的测试数据较少, 并且缺乏定量化。

根据对枪口焰烟探测论证与设计的需求, 需要获得实战中枪口焰烟光学特性。依托现有光学测量设备, 本文作者提出了一种外场枪口焰烟光学特性的测量方法。按照该方法对国内两种典型口径步枪的枪口焰烟特性进行了测量, 并进行了数据处理分析, 获得了其光学特性, 为后续狙击后探测方案设计提供了依据。

1 测试原理

枪口焰烟的光谱分布可采用光纤光谱仪和红外光谱辐射计测量, 温度场分布、面积、持续时间等特性可采用高帧频红外测温热像仪进行测量^[7]。

渐变滤光片式光谱辐射计的内部光路如图 1 所示, 目标的光线经过分光镜, 可见部分被内置 CCD 接收, 用于人眼观瞄^[8]。红外辐射部分通过斩波器, 当斩波器转动到打开状态时, 目标光学信息通过光阑和渐变滤光片 (CVF)、探测器透镜及探测器窗口, 被探测器接收; 当斩波器转动到关闭状态时, 内置参考黑体的辐射被探测器接收, 因此经过信号调制后探测器接收到的电子信号为

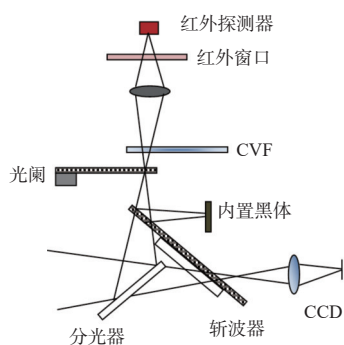


图 1 光谱辐射计内部光路图

Fig. 1 Internal optical path diagram of spectroradiometer

$$S(\lambda) = K(\lambda)[L(\lambda) - P(\lambda, T_{\text{ibb}})] \quad (1)$$

式中: $K(\lambda)$ 为光谱辐射计的光谱响应函数, 可通过仪器校准程序得到; $L(\lambda)$ 为目标光谱辐射; $P(\lambda, T_{\text{ibb}})$ 为内部黑体的光谱辐射; T_{ibb} 为内部黑体的温度, 与仪器内部环境温度相同。

当目标不能充满视场时, 探测出的信号中包括目标本身和背景, 这时需要进行两次测量, 一是目标与背景的总信号, 另一个是背景信号, 根据两次测量可获得目标的光谱辐射强度为

$$I(\lambda) = [S_t(\lambda) - S_b(\lambda)] / K(\lambda) * r^2 * (L/a)^2 \quad (2)$$

式中: $S_t(\lambda)$ 为测量的目标光谱; $S_b(\lambda)$ 为测量的背景光谱; $k(\lambda)$ 为目标未充满仪器视场时的光谱响应函数可通过仪器校准程序得到; L 为目标距离; r 为校准时腔黑体的出射口径; a 为校准时黑体的距离。

目标的辐射温度场分布测量可通过中波和长波测温热像仪来进行, 红外测量热像仪的辐射标定模型如下:

$$DN = k \cdot L + DN_0 \quad (3)$$

式中: DN 为热像仪的测量输出灰度值; k 为热像仪的辐射亮度响应度; L 为面源黑体的在热像仪相应波段的辐射亮度; DN_0 为热像仪自身辐射和背景辐射等因素引起的偏置值。根据热像仪测量目标时的参数, 设置其积分时间保持不变, 及黑体的温度等, 采集多点辐射源亮度 L_i 对应的热像仪输出灰度值 DN_i :

$$\begin{cases} DN_1 = k \cdot L_1 + DN_0 \\ DN_2 = k \cdot L_2 + DN_0 \\ \dots \\ DN_n = k \cdot L_n + DN_0 \end{cases} \quad (4)$$

记录响应的参数设置及标定距离、图像区域、环境温度等参数, 保存标定数据, 并拟合为标定曲线 $DN=f(L)$, 通过测量的目标灰度值, 可以计算得到目标的辐射亮度和等效辐射温度。

假设采集图像中背景区域的最大灰度值为 D_b , 可认为图像中大于 D_b 的像素为目标像素, 则目标的辐射面积 A 为

$$A = Nabr^2/f^2 \quad (5)$$

式中: N 为目标所占的像素数; a 、 b 为热像仪探测器单元的尺寸; f 为热像仪的焦距; r 为目标与热像仪之间的距离。

2 测试过程

在射击过程中, 枪口焰烟的产生是由于发射药和空气产生化学反应, 在一定的温度湿度条件下

形成高温的二氧化碳、一氧化碳、水、碳等产物,其持续时间通常为几毫秒,并且焰烟温度范围宽(从常温到 500 ℃),要求摄像机有较高的帧频^[9]。文中采用二种弹道步枪进行射击试验,对应的子弹口径分别为 5.8 mm 和 7.62 mm 制式子弹。弹道枪是专门制造或从批量生产的中限尺寸的枪械中按照产品图及技术条件严格挑选出来的,主要用于枪弹弹道性能检查、标准弹和标准装药鉴定、枪弹和发射药验收及弹道研究^[10]。本次试验所用的弹道枪与作战中的枪支性能接近,并且可以实现电动击发,可以用于射击时枪口焰烟的研究。

根据相关资料文献,小型步枪枪口焰烟最初出现的中心位置在距离枪口 0.2 m~0.3 m 处,并且焰烟位置逐渐向前移动。焰烟形状可近似等效为椭球体(半轴大约为 0.36 m、0.15 m、0.15 m),持续时间为几毫秒^[11-12]。采用光纤光谱仪测量其紫外、可见、短波红外光谱时,需要设置短的积分时间以提高采样速度,并且测量时尽量靠近枪口以提高信噪比。

根据光谱辐射计的系统参数,其具有小视场(6 mrad)和大视场(100 mrad)两个测量视场,小视场模式光学口径大,灵敏度高,大视场模式光学口径小,灵敏度低,由于测量现场需要考虑仪器与人员操作等安全因素,因此可在近距离采用大视场模式测量,通过实际的测量来确定合适的测试距离。光谱采样频率较低(10 Hz),在枪口焰烟持续时间内每次只能采集 1.4 μm~14 μm 波段内 1/5 的数据长度,而且采集的波长范围具有随机性,因此可增加枪击次数,采集较多的样本来提取分析枪口焰烟的光谱特征。

测量枪口焰烟的温度场分布特性时,根据焰烟温度范围、尺寸与持续时间,热像仪焦距 50 mm,视场为 11°×8°,测量距离设置为 10 m。热像仪在满幅图像(分辨率为 320×256)的帧频为 200 Hz,考虑到焰烟持续时间为毫秒级,需要降低图像分辨率来提高采集帧频,同时还要兼顾温度测量范围。

枪口焰烟特性测量现场布局如图 2 所示,步枪选用 5.8 mm、7.62 mm 两种制式子弹及相应口径的弹道枪,步枪固定在平台上,试验过程中保持瞄准方向沿射击轨道方向不变。测量设备包括可见光纤光谱仪、短波红外光纤光谱仪、红外光谱辐射计、中波测温热像仪、长波测温热像仪,测量现场如图 3 所示。

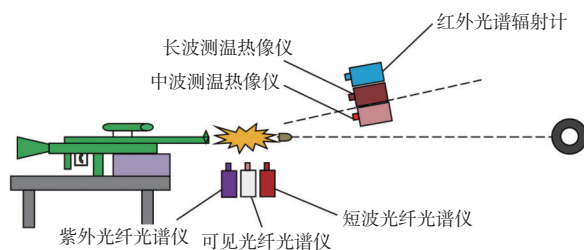


图 2 测试现场布局图

Fig. 2 Layout diagram of test site



图 3 枪口焰烟光学特性测试现场

Fig. 3 Test site for optical properties of gun flame and smoke

试验过程中首先对枪口焰烟进行了摸底测试,获得了焰烟位置、持续时间、温度范围和焰烟面积等初步参数,根据这些参数对测量设备参数进一步优化。

热像与光谱辐射计放置在射击弹道轴线外 15°方向,距离为 10 m,主要用来模拟测量枪口焰烟迎头方向的光学特性,测量设备参数设置如表 1 所示。试验在某一弹道场地进行,当天天气多云无风,温度为 21 ℃,湿度为 38%。测试完成后对红外光谱仪和测温热像仪进行了标定,对测试数据进行了处理分析。

表 1 测试设备参数设置

Table 1 Parameters set for test device

参数类型	测试设备		
	光谱辐射计	测温热像仪	光纤光谱仪
探测器	InSb/MCT	MCT	线阵 CCD
光谱范围/μm	1.4~14	中波: 3.7~4.8 长波: 7.7~9.3	0.18~0.43 0.4~1.0 0.9~1.7
光谱/图像分辨率	2%	中波: 192×168 长波: 200×110	4 nm~20 nm
采样频率/Hz	10	中波: 500 长波: 788	400
测试距离/m	10	10	0.3

3 测试结果与分析

3.1 5.8 mm 步枪枪口焰烟光学特性

图 4 为 5.8 mm 步枪近红外波段枪枪口焰烟的相对光谱能量分布, 图 5 为 5.8 mm 步枪红外波段枪枪口焰烟的光谱辐射强度分布。图 6 和图 7 分别为 5.8 mm 步枪枪口焰烟的中波、长波热图像, 其中热像仪的图像分辨率为 192×168, 积分时间设置为 358 μs, 测温范围为 150 ℃ ~ 500 ℃, 采样频率为 500 Hz; 长波热像仪的图像分辨率为 200×110, 积分时间设置为 98 μs, 测温范围为 150 ℃ ~ 500 ℃, 采样频率为 788 Hz。

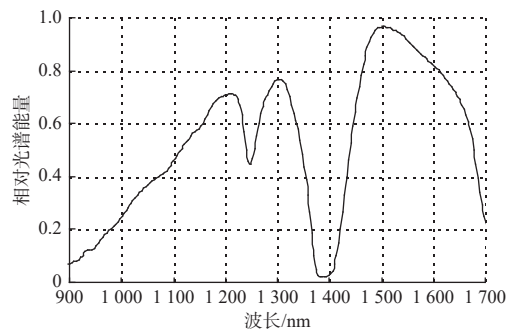


图 4 5.8 mm 口径步枪枪口焰烟在 0.9 μm~1.7 μm 的光谱分布

Fig. 4 Spectral distribution of gun flame and smoke of 5.8 mm-caliber rifle in 0.9 μm~1.7 μm

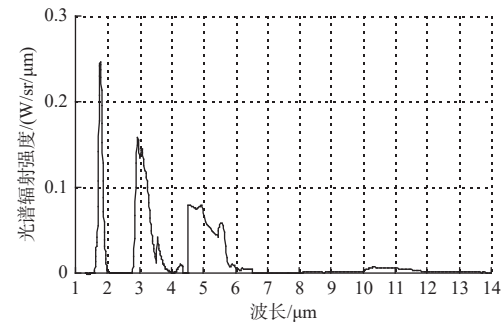


图 5 5.8 mm 口径步枪枪口焰烟在 1.4 μm~14 μm 的光谱分布

Fig. 5 Spectral distribution of gun flame and smoke of 5.8 mm-caliber rifle in 1.4 μm~14 μm

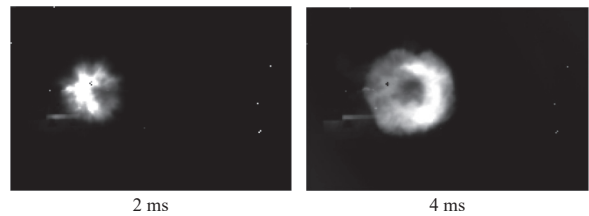


图 6 5.8 mm 口径步枪枪口焰烟的中波红外热像
Fig. 6 Mid-wave infrared images of gun flame and smoke of 5.8 mm-caliber rifle

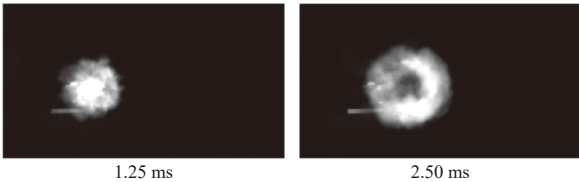


图 7 5.8 mm 口径步枪枪口焰烟的长波红外图像
Fig. 7 Long-wave infrared images of gun flame and smoke of 5.8 mm-caliber rifle

3.2 7.62 mm 步枪枪口焰烟光学特性

图 8 为 7.62 mm 步枪近红外波段枪口焰烟的相对光谱能量分布, 图 9 为 7.62 mm 步枪红外波段枪口焰烟的光谱辐射强度分布。图 10 和图 11 分别为 7.62 mm 步枪枪口焰烟的中波、长波热图像, 其参数分别与图 6 图 7 相同。

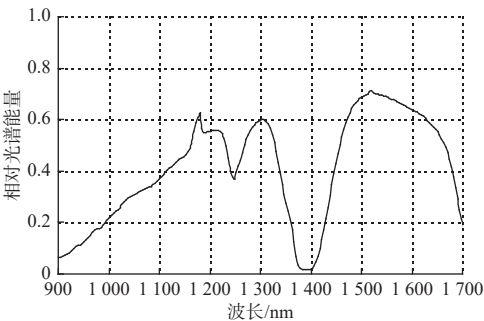


图 8 7.62 mm 口径枪口焰烟在 0.9 μm~1.7 μm 的光谱分布
Fig. 8 Spectral distribution of gun flame and smoke of 7.62 mm-caliber rifle in 0.9 μm~1.7 μm

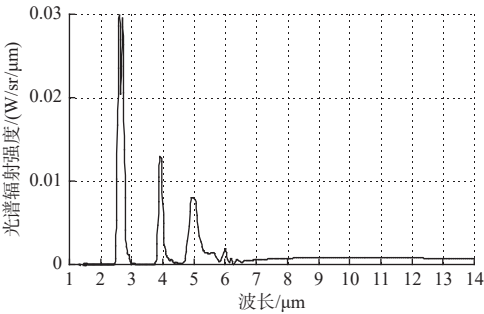


图 9 7.62 mm 口径枪口焰烟在 1.4 μm~14 μm 的光谱分布
Fig. 9 Spectral distribution of gun flame and smoke of 7.62 mm-caliber rifle in 1.4 μm~14 μm

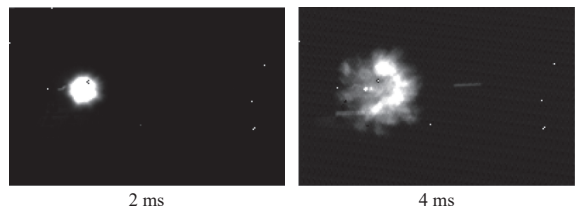


图 10 7.62 mm 口径枪口焰烟的中波红外热像
Fig. 10 Mid-wave infrared images of gun flame and smoke of 7.62 mm-caliber rifle

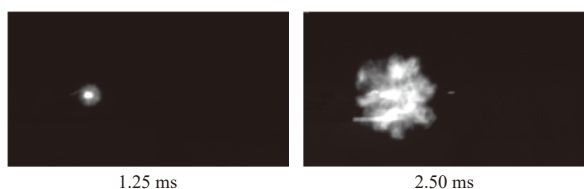


图 11 7.62 mm 口径枪口焰烟的红外热像

Fig. 11 Long-wave infrared images of gun flame and smoke of 7.62 mm-caliber rifle

3.3 枪口焰烟光学特性分析

根据现场测试的两种口径弹道步枪枪口焰烟的测试数据可以得到以下结论。

1) 枪口焰烟气体的辐射与固体辐射有许多不同之处。对于单原子或对称原子气体,并无发射和吸收辐射的能力,可认为是热辐射的透明体。但对于三原子、多原子及结构不对称的双原子气体,其辐射对波长具有很强的选择性^[13],只在某些波长区段内具有辐射能力,这些气体的发射率通常在 0.05~0.1 之间。从测量结果来看,枪口焰烟红外光谱主要分布在 $2\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 较宽的波段内,在 $2.3\ \mu\text{m}\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 、 $2.8\ \mu\text{m}\sim 2.9\ \mu\text{m}$ 、 $3.2\ \mu\text{m}\sim 3.3\ \mu\text{m}$ 、 $3.8\ \mu\text{m}\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 、 $4.3\ \mu\text{m}\sim 4.6\ \mu\text{m}$ 、 $4.8\ \mu\text{m}\sim 5.0\ \mu\text{m}$ 附近有较强的辐射,对应发射药燃烧产物 CO 、 CO_2 、 H_2O 、 N_2O 、 $\text{HO}^\cdot$ 、 CH_4 的发射光谱。

2) 由于枪口焰烟的持续时间为 6 ms 左右,现有光谱仪采用旋转滤光片进行分光,最高测量频率为 10 Hz,在焰烟持续时间段内无法完成 $1.4\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段范围的光谱测量,所以测量光谱为多次测量光谱数据的拼接。

3) 由于试验在白天进行,采用光纤光谱仪测量受白天环境干扰较大,并且采样速度快、采样数据有限,在可见光波段对枪口焰烟进行探测存在一定的困难^[14]。从试验结果看,紫外可见光波段未获得枪口焰烟的光谱数据,但近红外短波红外波段采集到枪口焰烟比较明显的光谱信号,其中 $1.4\ \mu\text{m}$ 和 $1.9\ \mu\text{m}$ 附近的凹陷是由于水汽的吸收引起的。其中在 $2\ \mu\text{m}\sim 5.5\ \mu\text{m}$ 之间有多个较强的辐射带,分别对应 H_2O 、 CO 、 CO_2 的辐射光谱,在长波波段的分布接近灰体,无明显的特征峰。根据国外研究报道,在紫外波段 ($0.2\ \mu\text{m}\sim 0.4\ \mu\text{m}$) 没有测量到枪口焰烟明显的辐射信号^[15]。

4) 枪口焰烟在测量方向上的投影近似为圆形,在射击后 2 ms 左右辐射温度达到最高,焰烟中心温度较高,周围温度较低;随后枪口焰烟温度逐渐降低,形状变为不规则烟雾状。

5) 从采集的中波和长波热像可以看出,高温火焰出现在 2 ms 内,2 ms 后枪口主要以热烟为主,烟的温度随着时间增加而逐渐降低。焰烟中波持续时间约为 6 ms,长波持续时间约为 10 ms。

6) 在中波 ($3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$) 波段,5.8 mm 枪口焰烟的辐射强度最大值出现在 2 ms 附近,为 12.5 W/sr;7.62 mm 枪口焰烟的辐射强度最大值出现在 2 ms 附近,为 9.3 W/sr。

7) 在长波 ($8\ \mu\text{m}\sim 12\ \mu\text{m}$) 波段,5.8 mm 枪口焰烟的辐射强度最大值出现在 2 ms 附近,为 32.4 W/sr;7.62 mm 枪口焰烟的辐射强度最大值出现在 2 ms 附近,为 9.4 W/sr。

4 结论

针对狙击作战中枪口焰烟探测告警需求,开展了枪口焰烟光学特性测量方法的研究。根据枪口焰烟相关资料,结合现有光谱辐射测量设备的性能参数,对 5.8 mm、7.62 mm 两种口径弹道步枪枪口焰烟的光谱、辐射温度场、辐射面积、持续时间等特性进行了外场测试,对测试数据进行了处理分析。结果表明,弹道枪枪口焰烟的持续时间在 6 ms 左右,其能量分布主要集中在短波和中波红外波段,并且 5.8 mm 弹道步枪枪口焰烟辐射能量明显高于 7.62 mm 弹道步枪。枪口焰烟的光学特性测试结果,为枪口焰烟的探测及发射药的改进提供了重要参考。

参考文献:

- [1] 黄龙华,何黎明. 战场“照妖镜”反狙击手探测系统[J]. 国防科技,2006,3(18): 33-34.
HUANG Longhua, HE Liming. “Demon Mirror” of battlefield of detecting system for anti-sniper[J]. National Technology, 2006, 3(18): 33-34.
- [2] 王宏,孙美,冯伟,等. 发射药枪口焰烟检测技术研究[J]. 火炸药学报,2002,25(2): 57-58.
WANG Hong, SUN Mei, FENG Wei, et al. Study on the measurement technique for muzzle smoke and flash of deterred propellants[J]. Chinese Journal of Explosive & Propellants, 2002, 25(2): 57-58.
- [3] 孔德仁,孟迎军,李永新,等. 枪口焰烟光电测量方法探讨[J]. 南京理工大学学报,1998,22(6): 497-498.
KONG Deren, MENG Yingjun, LI Yongxin, et al. Discussion of measuring method for muzzle flash and smoke[J].

- Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1998, 22(6): 497-498.
- [4] 刘振吉, 楚盛, 杨永辉, 等. 用于枪击探测的紫外光传感器技术指标分析[J]. 应用光学, 2015, 36(3): 443.
- LIU Zhenji, CHU Sheng, YANG Yonghui, et al. Technical index of ultraviolet sensor used for detecting shooting[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(3): 443.
- [5] MARIUSZ K, RAFAL D, PIO T. Electro-optical passive sniper detection conception and system overview[J]. Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 2010, 59(3): 277-281.
- [6] 张伟, 李克新, 武春风, 等. 多光谱目标探测的波段选择[J]. 光学技术, 2005, 31(6): 893-894.
- ZHANG Wei, LI Kexin, WU Chunfeng, et al. Wavelength band selection method of multispectral target detection[J]. Optical Technique, 2005, 31(6): 893-894.
- [7] 王裕文, 罗景华, 王祥林, 等. 炮口火焰温度场的测试研究[J]. 红外技术, 1989, 11(2): 23-24.
- WANG Yuwen, LUO Jinghua, WANG Xianglin, et al. Study of testing temperature field for muzzle flashe[J]. Infrared Technology, 1989, 11(2): 23-24.
- [8] TECHNOLOGIES S B S. Spectroradiometer(SR-5000/SR-5000W) operation and maintenance Manual[M]. Israel, 2004, Rev c: 13-15.
- [9] 袁治雷, 贺增第. 一种炮口火焰的测试方法研究[J]. 含能材料, 2011, 19(5): 575-579.
- YUAN Zhilei, HE Zengdi. A method to measuring muzzle flash of gun propellants[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(5): 575-579.
- [10] URGEN K, CHRISTIAN E, DIRK S. Electro-optical muzzle flash detection[J]. SPIE, 2016, 9987: 99870-2.
- [11] KASTEK, DULSKI M, PIATKOWSKI R, et al. Analysis of multi-spectral signatures of the shot[C]. SPIE, 2011, 8019: 80190-11.
- [12] 王哲, 雷鸣. 基于PbS的枪口火焰探测系统[J]. 电子工程设计, 2013, 21(3): 180-181.
- WANG Zhe, LEI Ming. Research of the muzzle fire detect system based on PbS detector[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(3): 180-181.
- [13] 付永升, 雷秉山, 闫克丁. 枪口火光探测系统研究[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(12): 2412-2413.
- FU Yongsheng, LEI Bingshan, YAN Keding. System research based on muzzle flame[J]. Computer & Digital Engineering, 2017, 45(12): 2412-2413.
- [14] KARLHOLM J, RENHORN I. Wavelength band selection method for multispectral target detection[J]. Applied Optics, 2002, 41(2): 6786-6790.
- [15] KLINGENBERG G. Gun muzzle blast and flash[J]. Propellants & Explosives & Pyrotechnics, 1989, 14(2): 57-60.