

文章编号: 1003-1480 (2024) 05-0084-07

# 基于多光谱辐射测温法的换能元桥区温度检测技术

李党娟<sup>1</sup>, 丁成皎<sup>1</sup>, 樊洋<sup>1</sup>, 王可暄<sup>2</sup>, 万文博<sup>1</sup>, 苏俊宏<sup>1</sup>

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安, 710021; 2. 陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安, 710061)

**摘要:** 火工品换能元起爆过程中桥区温度的全程化精确测量对于研究换能元的电热转换效率、表征火工品点火性能至关重要。本研究通过建立包含6个波长通道的多光谱辐射测温系统, 实现了对换能元桥区辐射光谱信号的实时采集, 并通过PS800-25一体化标准黑体进行系统标定。针对桥区材料在起爆过程中经历的固态、液态到气态的相变, 建立了最优化函数温度解算模型, 避免了对光谱发射率模型的依赖, 并通过罚函数法进行真温的优化求解。试验结果表明, 该方法的测温精度在3%以内, 可应用于碳基桥箔点火过程中桥区温度的检测。

**关键词:** 换能元; 火工品; 多光谱辐射测温; 最优化函数温度解算; 碳基桥箔

中图分类号: TJ450.6 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.05.013

## Temperature Measurement of Transducer Bridge by Multispectral Radiation Thermometry

LI Dang-juan<sup>1</sup>, DING Cheng-jiao<sup>1</sup>, FAN Yang<sup>1</sup>, WANG Ke-xuan<sup>2</sup>, WAN Wen-bo<sup>1</sup>, SU Jun-hong<sup>1</sup>

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, 710021; 2. Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

**Abstract:** The precise measurement of the temperature in the bridge area is very important to study the electric thermal conversion efficiency and characterize the ignition performance of the initiating explosive device. In this study, a multispectral radiation thermometry system with 6 wavelength channels was established to realize real-time acquisition of radiation spectral signals from the transducer bridge area, and calibrated through the PS800-25 integrated standard in black body. In view of the phase transition from solid, liquid to gas in the bridge area in the initiation process, an optimization function temperature calculation model was established, which avoids the dependence on the spectral emissivity model, and optimizes the true temperature by the penalty function method. The test results show that the temperature measurement errors of this method is smaller than 3%, the method can be applied to the detection of the bridge area temperature during the ignition of the carbon-based bridge foil.

**Key words:** Transducer; Initiating explosive device; Multispectral radiation thermometry; Optimization function temperature calculation; Carbon-based bridge foil

换能元是火工品中实现能量转换的关键部件。当对换能元桥区施加脉冲电流时, 桥区材料在电热转换作用下迅速升温至汽化点, 形成瞬态高温等离子体、冲击波和大量活性粒子, 实现从燃烧到爆轰的转变。在这一复杂的瞬态物理化学作用过程中, 换能元桥区

的电热转换特性对火工品的点火和起爆性能有着直接的影响<sup>[1-2]</sup>。因此, 精确测量桥区在起爆过程中的温度变化对于研究换能元作用机理和评估火工品的点火性能至关重要。

多光谱辐射测温技术作为辐射测温领域的关键

收稿日期: 2024-09-09

作者简介: 李党娟 (1978-), 女, 副教授, 主要从事光电检测与成像技术研究。

通讯作者: 苏俊宏 (1963-), 男, 教授, 主要从事光电检测与薄膜技术研究。

基金项目: 瞬态化学效应与控制全国重点实验室开放课题资助项目 (No.WDYX23614260206)。

引用本文: 李党娟, 丁成皎, 樊洋, 等. 基于多光谱辐射测温法的换能元桥区温度检测技术[J]. 火工品, 2024(5): 84-90.

技术之一,通过在多个波长下采集目标的亮度温度信息,并通过算法反演得到目标的真实温度<sup>[3-5]</sup>。在多光谱辐射温度的反演过程中,一般需要找到光谱发射率与波长、温度等变量之间的函数关系,以光谱发射率的函数表达式替代其值。常用的光谱发射率模型包括灰体假设模型、波长假设模型、真温假设模型(二次测量法)等。灰体假设模型设定光谱发射率是一个常数,其数值大小不随温度、波长等变量发生变化<sup>[6-7]</sup>,数据处理最简单,但对发射率变化较大的目标会产生很大的反演误差。波长假设模型设定在某一波段内波长与光谱发射率之间存在固定函数关系,尽管测温精度有限,但能提供一定程度的温度信息<sup>[4,8]</sup>。真温假设模型(二次测量法)通过建立光谱发射率与真温的函数关系来计算得到真温值<sup>[9-10]</sup>。虽然反演精度较高,但是迭代法的求解使计算用时较长。因此,为了满足实时测量的需求,提高真温反演的速度是急需解决的问题。

针对火工品换能元点火过程中桥区经历了固态、液态到气态的相变,以及光谱发射率的剧烈变化,本文提出了一种不依赖于光谱发射率模型的辐射温度求解方法。该方法以寻求目标函数极小值的方式进行温度计算,具有灵活性高、效率高和应用范围广的优点,为火工品的温度测量提供了技术支持。本研究建立了6通道光谱辐射测温系统,完成了系统的标定与测温精度验证,并应用于碳基桥箔桥区的温度测量。

## 1 基本原理

### 1.1 多光谱辐射测温原理

多光谱辐射测温技术是通过分析物体在多个波长通道的辐射信号,依据辐射谱线的强度来推算物体的温度。根据维恩公式与亮度温度的基本定义,设定多光谱辐射测温系统第*i*个测量通道的波长为 $\lambda_i$ ,在物体的真实温度*T*时,该物体的光谱辐射亮度 $L_\lambda(T)$ 与某一温度 $T_i$ 时黑体的光谱辐射亮度 $L_{\lambda,b}(T_i)$ 相等,即:

$$L_\lambda(T) = L_{\lambda,b}(T_i) \quad (1)$$

式(1)中:

$$L_\lambda(T) = \varepsilon_\lambda(T) \frac{c_1 \lambda_i^{-5}}{e^{c_2/\lambda_i T} - 1} \quad (2)$$

$$L_{\lambda,b}(T_i) = \frac{c_1 \lambda_i^{-5}}{e^{c_2/\lambda_i T_i} - 1} \quad (3)$$

式(1)~(3)中:*T*为待测目标的真温; $T_i$ 为第*i*通道的亮度温度; $\lambda_i$ 为每个通道的中心波长; $\varepsilon_\lambda(T)$ 为温度*T*时被测物体光谱发射率; $c_1$ 和 $c_2$ 为辐射常数。

当 $c_2/\lambda_i T \gg 1$ 时,基于维恩公式的多光谱高温计的亮度温度模型为:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_i} = \frac{\lambda_i}{c_2} \ln \varepsilon_i \quad (4)$$

多光谱高温计的每一个光谱测量通道都满足公式(4),则*N*个光谱测量通道可以构成*N*个方程,这*N*个方程中含有*N*个未知的光谱发射率变量 $\varepsilon_i$ 和1个未知的真温变量*T*,因此该方程组属于欠定方程组,其解具有不确定性。

### 1.2 最优化函数温度解算模型

基于最优化函数的温度求解算法不需要建立光谱发射率与真实温度或波长之间的假定模型,将温度求解转换为一个数学优化问题来分析处理<sup>[11-12]</sup>。该方法直接从数据出发寻求最佳解决方案,避免了物理模型的复杂假设,提高了算法的适用性和灵活性。

#### (1) 目标函数

多光谱辐射测温系统中每1个通道的亮度温度、真温和光谱发射率之间满足公式(4),因此某一测量通道的真温可表示为:

$$T_z = \frac{c_2 T_i}{\lambda_i T_i \ln \varepsilon_i + c_2} \quad (5)$$

式(5)中: $T_z$ 为待测目标的真温。

对于同一物体的同一次测量,真温具有唯一性,其真温必有 $T_{zi} = T_{z(i+1)}$ 。但是,随机误差的存在会造成实际的测试过程中 $T_{zi} \neq T_{z(i+1)}$ 。由于测量真温是待求的未知量,因此这里采用贝塞尔(Bessel)公式表示的标准差最小作为目标函数方程,即:

$$F(T) = \min \left( \sqrt{\sum_{i=1}^N (T_{zi} - \bar{T})^2 / (N-1)} \right) \quad (6)$$

式(6)中: $\bar{T}$ 为不同测量通道的真温平均值。

当  $F(T)$  取得极小值时对应的平均温度  $\bar{T}$  视作被测目标的真温。

## (2) 等式约束条件

为了构造等式约束条件, 首先对公式 (4) 的  $N$  个光谱通道相加并取平均值, 可得:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{T_i} + \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{c_2} \ln \varepsilon_i \right) \quad (7)$$

再将式 (7) 中第 1 个通道方程与式 (4) 相减, 可得:

$$v_1 = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{T_i} + \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{c_2} \ln \varepsilon_i \right) - \left( \frac{1}{T_1} + \frac{\lambda_1}{c_2} \ln \varepsilon_1 \right) \quad (8)$$

式 (8) 中:  $v_1$  为第 1 通道测量的残余误差。

理想情况下的残余误差为零, 因此式 (8) 可进一步整理得:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{T_i} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{c_2} \ln \varepsilon_i = \frac{1}{T_1} + \frac{\lambda_1}{c_2} \ln \varepsilon_1 \quad (9)$$

通过上述处理, 式 (9) 中不再含有待求的真温  $T$ , 只有光谱发射率  $\varepsilon_i$  是未知数。式 (9) 构成了光谱发射率  $\varepsilon_i$  之间的等式约束条件。

## (3) 不等式约束条件

由辐射测温的基本理论可知, 光谱发射率范围都在 0 和 1 之间:

$$0 < \varepsilon_i < 1 \quad (10)$$

式 (10) 关系构成了单目标函数极小值真温模型的不等式约束条件, 限制了式 (9) 中等式约束条件的取值范围, 减少了冗余数据也提高了算法的反演速度。

## (4) 求解方法

以上模型可等效为如下约束优化问题:

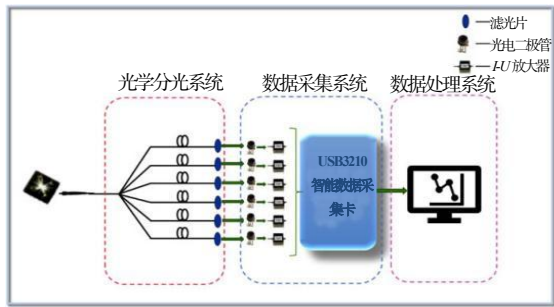
$$\begin{cases} \min f(x) \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (11)$$

式 (11) 中:  $f(x)$  为目标函数;  $Aeq \cdot x = beq$  为线性等式约束条件;  $ub$  和  $lb$  分别为变量的上、下边界。可以采用内点算法、序列二次规划算法、有效集算法和信赖域反射算法等进行求解。基本思想是从给的初始点开始, 在满足约束的条件下, 沿着目标函数下降的方向迭代, 最后收敛到局部最优解。

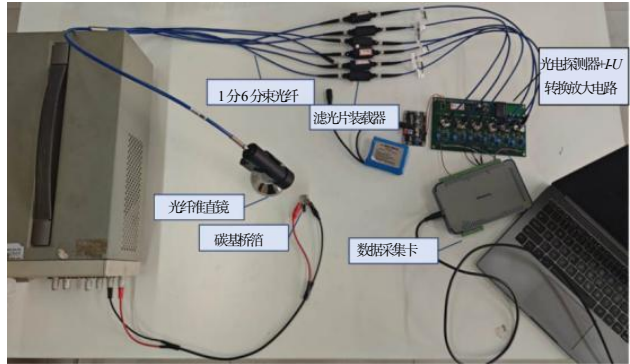
## 2 多光谱辐射测温系统

### 2.1 试验系统

用于换能元桥区温度测量的多光谱辐射测温系统由 6 个测温通道组成, 中心波长分别为 780, 850, 920, 980, 1 064, 1 550 nm。系统的结构与装置如图 1 所示。整个系统由 3 个主要部分组成: 光学分光系统、数据采集系统和数据处理系统。



(a) 结构示意图



(b) 试验装置图

图1 多光谱辐射测温系统

Fig.1 Multi-spectral radiation temperature measurement system

光纤准直镜将桥区的辐射光聚焦并引导至光纤中, 然后通过 1 分 6 分束光纤将光线均匀分配到 6 个通道中; 光纤的尾端接入到装有滤光片的光电二极管, 当光电二极管接收到光信号时, 会产生微弱的反向电流, 该电流信号经  $I-U$  转换放大电路转换为电压信号, 供数据采集卡采集, 然后通过多通道数字采集卡将模拟信号转换为数字信号并传输至 PC 端。

### 2.2 系统标定

标定系统的结构如图 2 所示, 采用 PS800-25 一体化黑体作为标定源。

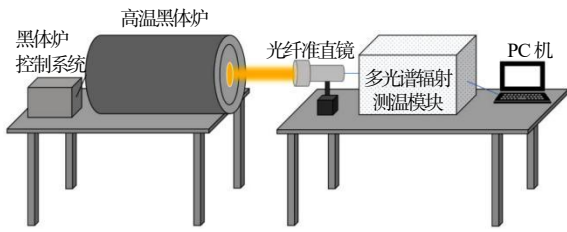


图2 标定系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of calibration system

标定过程包括以下步骤:

- (1) 遮挡光纤准直镜, 记录每个通道的电压数据 10 次, 去除极端值后, 对每个通道剩下的 8 组电压值取平均, 作为该通道的零点电压;
- (2) 将多光谱辐射测温装置的光纤准直镜反向对准高温黑体炉窗口, 确保准直镜能够完全接收黑体炉的辐射能量;
- (3) 在 300 ~ 800 °C 范围内, 每隔 50 °C 设置 1 个标定点, 待黑体炉温度稳定后, 记录每个通道的电压值, 每个通道记录 10 组数据, 去除极端值后取平均值, 并将得到的电压均值与对应温度记录保存;
- (4) 采用如式 (12) 所示的最小二乘法数学模型, 对电压——温度之间的关系进行拟合:

$$\ln(U_i) = A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} \quad (12)$$

式 (12) 中:  $U_i$  为第  $i$  个通道下记录的电压值;  $T$  为各标定点温度;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为拟合系数。

标定采集到的电压信号及拟合结果如图 3 所示, 拟合系数如表 1 所示。结果表明, 采集的原始电压数据与拟合数据几乎完全吻合, 所采集的电压随着温度的升高呈现出指数式增长的状态。

表 1 各通道的拟合系数

Tab.1 Fitting coefficients for each channel			
通道	A	B	C
CH0 (780 nm)	9.456 3	-8 967.170 3	1 531 803.731 3
CH1 (850 nm)	9.864 1	-8 921.342 2	1 550 179.113 3
CH2 (920 nm)	9.884 4	-9 168.369 6	1 715 286.834 9
CH3 (980 nm)	9.874 7	-8 920.028 8	1 493 939.576 6
CH4 (1 064 nm)	9.823 7	-8 591.151 7	1 392 703.209 1
CH5 (1 550 nm)	6.311 1	-6 016.855 4	1 029 335.126 5

### 2.3 精度分析

采用图 2 的试验系统对标准黑体的温度进行测量, 以验证该测温系统的精度。具体过程为:

- (1) 将光纤准直镜以反向给光的方式对准高温

黑体炉辐射出口, 使得高温黑体炉的辐射能量被完全接收;

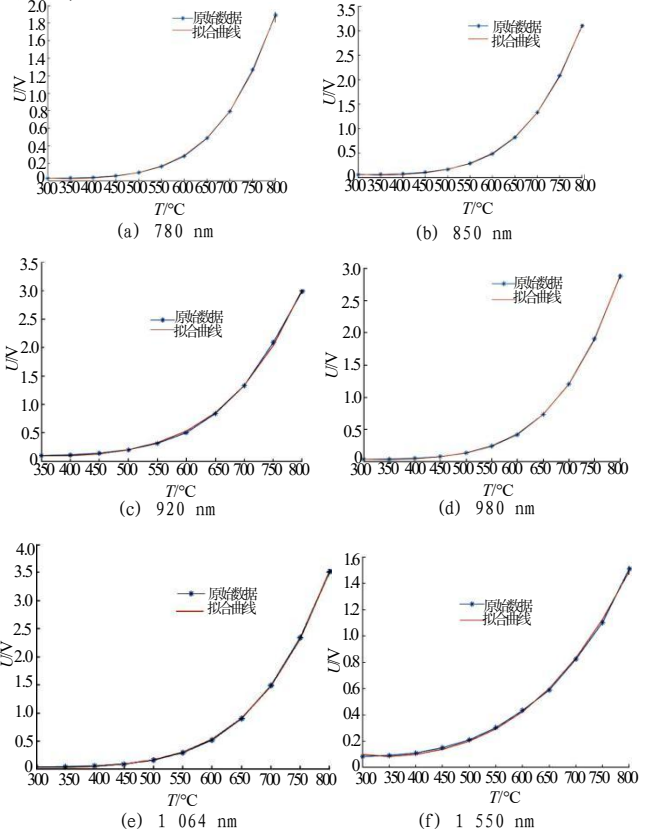


图 3 6 组波长通道电压——温度拟合曲线图

Fig.3 The voltage vs temperature fitting curves for six wavelength channels

- (2) 将高温黑体炉每间隔一定温度改变一次, 黑体的温度为作为标准温度;
- (3) 待黑体稳定后用多光谱辐射测温系统采集信号, 并进行温度解算得到实测温度;
- (4) 计算实测温度与标准温度的相对误差  $\delta$ :

$$\delta = \left| \frac{\Delta}{T_L} \right| \times 100\% \quad (13)$$

式 (13) 中:  $\Delta$  为实测温度与标准温度的差;  $T_L$  为黑体炉标准温度。

试验得到黑体的实测温度及最大相对误差如表 2 所示。从试验结果可知, 该系统的测温精度在 3% 以内。

表 2 黑体温度实测结果与最大相对误差  
Tab.2 Measurement results of blackbody temperature and maximum relative errors

标准温度/°C	实测温度/°C	最大相对误差/%
475	485.81	2.28
525	516.36	1.65
575	570.73	0.74
625	629.01	0.64
675	678.37	0.50
725	721.73	0.45
775	780.02	0.65

### 3 碳基桥箔桥区温度测量

采用本课题组自制的碳基桥箔作为测试对象开展了3组试验,碳基桥箔的结构如图4所示,碳基桥箔参数如表3所示。将多光谱辐射测温系统的前端光纤聚焦镜对准碳基桥箔的桥区。



图4 试验所用碳基桥箔

Fig.4 Carbon-based bridge foil used in the test

表3 碳基桥箔参数

Tab.3 Parameters of carbon-based foil bridge

桥区材料	桥区尺寸/ $\mu\text{m}$	桥膜厚度/ $\mu\text{m}$
石墨	300×400	4

#### 3.1 碳基桥箔桥区温度变化

为探究在特定电阻值和发火电压条件下,碳基桥箔桥区温度的动态变化,本试验通过施加一个已知的电压来模拟实际应用中的电爆发火过程,以观察桥区温度随时间的变化。

第1组试验碳基桥箔的电阻值为 $5.62\ \Omega$ ,对碳基桥箔两端施加32 V DC电压使碳基桥箔电爆发火,利用多光谱辐射测温系统采集到的原始电压信号如图5所示。

观察图5中的曲线可以发现,桥箔发火温度呈现先上升后下降的趋势,最终趋于稳定。数据采集的过程中伴随着噪声的出现,为提高信号的可靠性和稳定性,采用数据平滑方法有效地去除信号中的噪音数据,从而对原始数据进行预处理。处理结果如图5中红线所示,处理结果为后续的温度解算提供了更可靠的基础。

同一波长下,若实际物体的光谱辐射强度与某个温度下黑体的光谱辐射强度相等,则此时黑体的温度被称为实际物体在该波长下的亮度温度。根据黑体温度与光谱辐射强度即电压之间的拟合关系,可反推出各个通道电压数据对应的黑体温度,即各个通道的亮度温度,结果如图6所示。

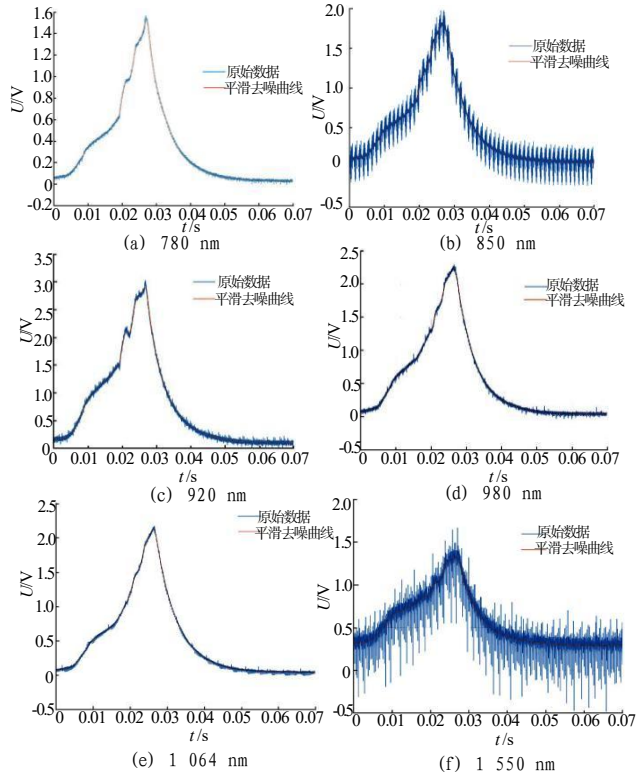


图5 各通道电压数据随时间变化的曲线及平滑效果

Fig.5 Voltage data of each channel and smoothing results

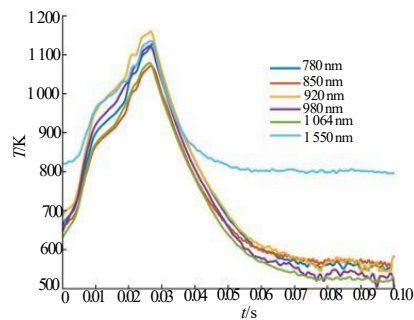


图6 各通道亮温计算结果(试验1)

Fig.6 Brightness temperature for each channel (test 1)

罚函数法由于其广泛的应用范围和直接利用 Matlab 工具箱的便利性,为解决多光谱温度求解问题的首选方法<sup>[13]</sup>。这种方法对于真温模型的结构提出了特定的要求,能够有效求解下述优化问题。此方法通过将约束条件内化为目标函数的一部分,使得原本受约束的优化问题转化为无约束问题,从而简化了编程过程并提高了求解效率。采用罚函数法进行真温求解,解算结果如图7所示。

从图7可以看出,对碳基桥箔施加触发电压后,桥区温度迅速上升到峰值后逐渐下降,温度峰值出现在0.027 s左右,峰值温度为1073K。

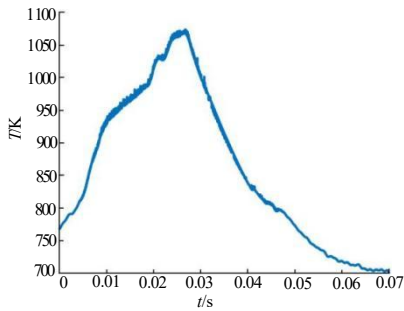


图7 碳基桥箔温度变化曲线(试验1)

Fig.7 Temperature variation curve of carbon-based bridge foil (test 1)

达到峰值后,温度开始迅速下降,桥箔中的能量开始释放,降温与材料的冷却过程和热量传递有关。在0.04 s左右温度下降速度放缓,表现为曲线的斜率减小。这可能是因为初始的热能迅速耗散到周围环境或者桥箔材料的其他部分,而随着系统整体温度的升高,热传递速度减慢。在0.06 s之后温度大致趋于稳定,系统进入一个相对平衡的冷却阶段,最后趋近于环境温度或系统的初始温度。

### 3.2 电阻值与发火电压对桥区温度的影响

电阻值和发火电压是影响火工品性能的两个关键参数。为研究这两个参数如何单独以及共同影响碳基桥箔桥区的温度变化,在试验1的基础上,进一步探索了不同电阻值和发火电压条件下桥区温度的变化。

第2组试验中碳基桥箔的电阻值为 $6.12\ \Omega$ 。对碳基桥箔两端施加32 V DC电压使碳基桥箔电爆发火,各个通道随时间变化的亮度温度结果如图8所示。采用罚函数法进行真温求解,解算结果如图9所示。

第3组试验中碳基桥箔的电阻值为 $8.14\ \Omega$ 。对碳基桥箔两端施加20 V DC电压使碳基桥箔电爆发火,各个通道随时间变化的亮度温度结果如图10所示。用罚函数法进行真温求解,解算结果如图11所示。

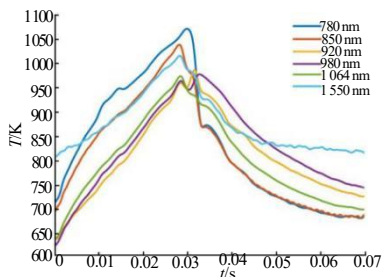


图8 各通道亮温计算结果(试验2)

Fig.8 Brightness temperature for each channel (test 2)

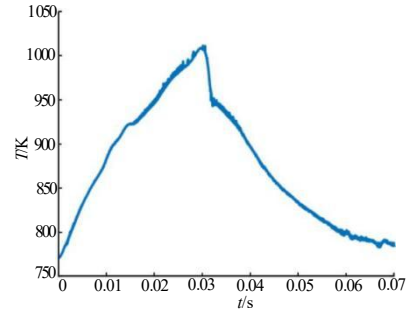


图9 碳基桥箔温度变化曲线(试验2)

Fig.9 Temperature variation curve of carbon-based bridge foil (test 2)

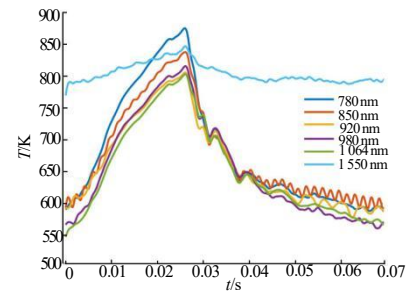


图10 各通道亮温计算结果(试验3)

Fig.10 Brightness temperature for each channel(test 3)

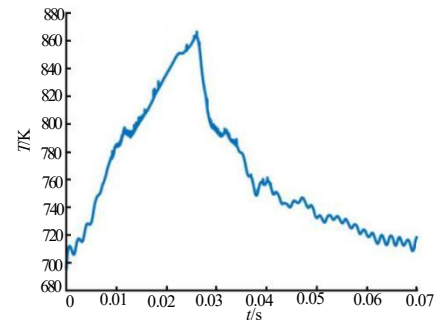


图11 碳基桥箔温度变化曲线(试验3)

Fig.11 Temperature variation curve of carbon-based bridge foil (test 3)

以上试验结果表明,桥区阻值和发火电压是影响桥区温度的重要因素。桥区阻值越大,桥区温度越低;发火电压越低,桥区温度越低。桥区温度的变化趋势在不同试验条件下具有一致性,即初始迅速上升至峰值后逐渐下降并趋于稳定。试验结果与理论分析相符,验证了多光谱辐射测温系统的有效性和准确性。

## 4 结论

本文从以下方面开展了研究,实现了火工品换能元起爆过程中桥区温度的高精度检测:

(1) 建立了6个波长通道的多光谱辐射测温系

统, 6个通道的中心波长分别为780, 850, 920, 980, 1064, 1550 nm。光纤准直镜将桥区辐射光聚焦引入光纤中, 结合滤光系统和I-U转换放大电路, 可实现换能元桥区多光谱辐射信号的实时采集。

(2) 根据换能元起爆过程中桥区材料光谱发射率的瞬时变化特性, 构建了基于亮度温度的优化函数温度解算模型。该方法的核心是构造一个目标函数, 并利用约束条件进行最优化函数求解, 不再需要假设光谱发射率模型, 温度求解精度高。

(3) 利用标准黑体对多光谱辐射测温系统进行了标定与精度验证, 测温误差小于3%。

(4) 利用该系统对碳基桥箔桥区温度进行了检测。测量结果表明, 对碳基桥箔施加触发电压后, 桥区温度迅速上升到峰值后逐渐下降, 温度峰值出现在0.027~0.030 s左右, 峰值温度为1073K。

#### 参考文献:

- [1] 李慧, 白颖伟, 任炜, 等. 火工品换能元直流激励下温度响应特性仿真研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(S2): 138-143.
- [2] 张文超. 复合半导体桥电爆特性及桥温变化的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [3] 王振涛, 戴景民, 杨森. 用于爆炸火焰真温场测量的多光谱热成像仪研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(12): 3885-3890.
- [4] 朱泽忠, 沈华, 王念, 等. 基于多光谱法的激发温度和辐射温度瞬态测试技术[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(2): 333-339.
- [5] Liu H, Zheng S, Zhou H, et al. Measurement of distributions of temperature and wavelength-dependent emissivity of a laminar diffusion flame using hyper-spectral imaging technique [J]. Measurement Science & Technology, 2016, 27(2): 025 201.
- [6] Aratjo A. Analysis of multi-band pyrometry for emissivity and temperature measurements of gray surfaces at ambient temperature[J]. Infrared Physics & Technology, 2016 (76): 365-374.
- [7] 张宁超, 张苗苗, 史国清. 强冲击下金属铜界面辐射特性测量研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2018, 55(4): 769-774.
- [8] Wen D, Mudawar I. Emissivity characteristics of polished aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(7): 1316-1329.
- [9] 王昌辉, 梁美, 梁磊. 用于固体火箭羽焰真温测量的宽量程多光谱高温计[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(9): 2860-2865.
- [10] Bekkeng T, Jacobsen K, Bekkeng J. Design of a multi-needle Langmuir probesystem[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(8): 085 903-1-085 903-5.
- [11] 张福才. 基于优化原理的多光谱真温反演算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [12] 邹舟. 基于最优化原理的多光谱辐射测温数据处理算法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
- [13] 李云龙, 邢键, 王博, 等. 基于约束优化的木材燃烧多光谱真温测量[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(7): 128-131.