

文章编号:1006-9941(2025)10-1201-09

单基发射药燃烧速度与光谱特性的同步测量法

李正義¹, 武志翔¹, 沈金朋², 傅卓江², 李唯一¹, 黄宇文¹, 曹芸彬¹, 尚丽平^{1,3}, 邓 琥¹

(1. 西南科技大学 信息与控制工程学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学 环境友好能源材料国家重点实验室, 四川 绵阳 621010; 3. 西南科技大学 极端条件物质特性联合实验室, 四川 绵阳 621010)

摘要: 为了深入探究单基发射药的燃烧性能,基于激光漫反射光谱测量原理,搭建了发射药燃烧性能多参量测量系统,对单基发射药以及双基发射药进行了燃烧参量的测量,获得了两者的燃烧光谱以及燃烧速度。结果表明:单基发射药在250~500 nm波段观测到OH*(313.9 nm),CO₂*(462.3 nm)和CHO*(421.7 nm)等基团的发射峰,主要归因于燃烧过程中火焰区存在的上述活性中间体。在500~780 nm波段存在明显的Na*(588.7 nm),K*(766.8 nm),Ca*(554.6 nm)的发射峰,分析其来自硝化棉中残留的木质素。与图像法和靶线法燃速测量对比结果表明,所提出的激光漫反射光谱测量方法测得的燃速与其基本吻合,最大相对误差分别为4.17%和9.97%。经双基发射药燃烧参量测量结果表明,该方法同样适用于双基发射药的燃烧速度及燃烧光谱同步测量,实现了对发射药燃烧速度的非接触、无损伤测量。

关键词: 单基发射药;燃烧光谱;燃烧速度;激光漫反射光谱测量方法**中图分类号:** TJ55;TH744**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/CJEM2025078

0 引言

单基发射药作为一种关键的含能材料^[1],其燃烧特性对于武器系统的设计、性能评估以及安全性具有至关重要的影响。随着现代军事技术的快速发展,对发射药燃烧过程的精确控制提出了更高的要求^[2]。尽管该领域已经积累了丰富的研究成果,但大多数研究主要集中在单一维度参数的测量上,如燃烧温度^[3]或光谱特性分析^[4]。相比之下,对发射药燃烧速度^[5]这一关键指标的研究仍显不足。同步获得发射药燃烧过程中光谱和燃速等关键指标以深入剖析燃烧机理的工作也鲜有。然而,此类综合研究对于全面把握燃烧过程、揭示其中复杂的物理化学相互作用具有极其重要的意义。

近年来,该领域在燃烧速度测量方面积累了丰厚经验。侯龙^[2]构建基于详细化学动力学的气固两相发射药燃烧基础模型。运用CHEMKIN软件对不同温压条件下的燃烧过程进行模拟,预估燃烧速度,并引入修正函数对燃速预估模型加以优化。采用密闭爆发器测得 $p-t$ 曲线获取燃速数据验证模拟结果。西北工业大学^[6]针对铝质固体推进剂,采用激光点火技术,对激光器与光纤光谱仪进行同步触发^[7]设置,通过观察486 nm AlO特征峰出现和消失的时刻,计算样品的点火延迟时间和燃烧时间^[8]。且利用声发射技术^[9]在3~9 MPa的压力下测量了燃速,其不确定度为0.1~0.2 mm·s⁻¹。但该方法极易受到信号干扰,且对实验环境和传感器精度的要求较高。Shu等^[10]搭建铝水推进剂燃烧测量平台,通过热电偶方式实现了燃速的测量。利用采集模块以20000帧/s收集数据,通过测量不同高度处的燃烧温度和记录达到最高温度的时间点计算燃速。该方法能够提供较为精确的燃烧速度,但它对实验设备的精度和同步性要求极高,且火焰辐射对测量结果的干扰较大。胡海航^[11]为解决图像法^[12]测量燃速时受火焰辐射影响的问题,提出了一种蓝光

收稿日期: 2025-04-21; **修回日期:** 2025-05-28**网络出版日期:** 2025-08-19**基金项目:** 国家自然科学基金(22275150);西安近代化学研究所开放基金(SYJJ20210411)**作者简介:** 李正義(2001-),男,硕士研究生,主要从事光谱分析、含能材料燃烧光谱方面的研究。e-mail: lzx@mails.swust.edu.cn**通信联系人:** 武志翔(1986-),男,副教授,主要从事检测技术与自动化设备、智能优化算法、光电检测、远场超分辨聚集功能器件研究。e-mail: zxwu@swust.edu.cn

沈金朋(1982-),男,副教授,主要从事含能材料研究。

e-mail: sjp0388@163.com

引用本文: 李正義,武志翔,沈金朋,等. 单基发射药燃烧速度与光谱特性的同步测量法[J]. 含能材料,2025,33(10):1201-1209.

LI Zheng-xi, WU Zhi-xiang, SHEN Jin-peng, et al. Synchronous Measurement Method for Combustion Rate and Spectral Characteristics of Single Base Propellant [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(10): 1201-1209.

阴影图像法,通过蓝光光源与蓝光滤光探测相结合的方式有效过滤火焰辐射光,仅对蓝光光源及固体推进剂药条的阴影图像进行成像。实验结果表明,该方法测得的燃速与靶线法^[13]结果对比,最大相对偏差仅为3.7%,这表明蓝光阴影图像法具有较高的测量精度。

在燃烧光谱方面,侯鹏飞^[14]采用电阻丝点火方式搭建了发射药燃烧火焰光谱测试系统。在空气氛围中对20/7单基发射药进行了燃烧光谱测试。结果表明,单基发射药的火焰光谱中存在很强的Na*、K*和Ca*发射峰,这些发射峰被认为源自硝化棉中残留的木质素。此外,Wang等^[15]通过结合热解动力学和燃烧光谱分析,深入研究了单基发射药从热解到燃烧的转变机制,燃烧过程中的关键气体产物和特征光谱信号。研究结果表明,单基发射药在热解过程中产生了CO、NH₃、NO和CO₂等气体。且在燃烧过程中,在589 nm和767、770 nm表现出Na和K元素的特征吸收峰。这些发现为预防潜在的燃烧事故提供了重要的理论依据。

综上所述,尽管在燃烧速度测量和燃烧光谱分析方面已经取得了一定进展,但很多方法对测量仪器以及实验环境有很高要求,且将多个燃烧参数综合起来以深入剖析燃烧机理的工作仍然较少。需要进一步整合燃烧速度、燃烧温度、光谱特性等多维度参数,期许能够同步测量燃烧光谱以及燃速等。为此,本研究针对上述研究的不足,提出了一种基于激光漫反射光谱测量原理的燃烧速度测量方法,在获取单基发射药燃烧速度的同时也记录了单基发射药的燃烧光谱,实现了单基发射药燃烧速度和燃烧光谱的同步测量。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

单基发射药,实验室3D打印自制;硝化棉(含量12.21%),泸州北方化学工业有限公司;二甲基甲酰胺(DMF),分析纯,上海阿拉丁有限公司。

仪器:多头磁力搅拌器,常州市金坛友联仪器研究所;真空干燥箱,北京中兴伟业仪器有限公司;3D打印机,定制。AvaSpec-2048TEEC-USB2 光纤光谱仪,爱万提斯科技有限公司,分辨率0.3 nm,光谱范围200~780 nm;acA3800-14 μ m 彩色相机,Basler公司,分辨率3840×2748,帧速率14 fps。

1.2 样品制备

将硝化棉(NC)预先烘干24 h,称量2 g NC溶于10 ml的DMF中,待溶解完全,设置3D打印机参数:

打印速度:1.2 mm·min⁻¹,打印平台温度:80 °C。然后进行3D打印,成型的单基发射药长68 mm,宽2 mm,厚1 mm,在真空干燥箱里50 °C烘干24 h。

1.3 单基发射药燃烧性能多参量测试系统

发射药燃烧性能多参量测试系统如图1所示。首先基于激光漫反射光谱测量方法搭建光谱测速部分:固定发射药,使用两个中心波长与单基发射药燃烧光谱特征谱段 $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ 不重叠的激光二极管,照射在发射药的P₁、P₂处,由于发射药表面光滑造成漫反射,再采用光纤光谱仪搭配Y型光纤,去捕捉两个激光的漫反射光,生成具有两个特征波峰的谱图,在点火之后待测样品条燃烧到第一激光落点P₁和第二激光落点P₂处,对应特征波峰漫反射光谱强度发生明显变化。因此,可通过记录两个特征峰光谱强度大幅下降的时间差表征待测样品条固定长度的燃烧时间 Δt ,以此计算燃速。

将光谱测速部分延展开,搭建单基发射药燃烧性能多参量整体实验系统,包括电阻丝点火部分、与激光漫反射光谱测量方法形成对照的图像法及靶线法等。为减少环境光对测试的干扰,自设计燃烧室,内部尺寸为400 mm×400 mm×400 mm,左侧面中心位置留有直径为40 mm的可视窗,用于放置acA3800-14 μ m 彩色相机,记录燃烧过程以及计算燃速。燃烧室右侧面预留两个光纤线、两个小型激光二极管电源线的进口以及一个废气收集的排气口。在燃烧室内部将小型激光二极管组件固定于适当位置,Y型光纤固定在同一高度且与指示光成一定夹角(30°~50°)去捕捉其漫反射光,外部放置光纤光谱仪,且排气口通过排气管、抽气泵与废气袋连接,收集燃烧产生的废气。燃烧室背面预留出口,使得与镍铬合金电阻丝连接的直流电源输出线以及与靶线连接的导线伸出分别连接直流稳压电源以及靶线法核心测量模块,也用作燃速测量。

1.4 实验过程

1.4.1 单基发射药燃烧性能多参量测试

发射药燃烧性能多参量测试系统调试流程如下图2所示。首先,为确定两指示光的特征波长,同时避免指示光光谱对单基发射药燃烧光谱造成干扰,以中心波长与样品燃烧特征谱段不重叠的原则确定指示光特征波长。开展一组单基发射药燃烧光谱测量实验,获取其燃烧光谱,初步选定了中心波长为405 nm和520 nm的激光二极管作为指示光,然后通过光谱仪获取两指示光的光谱图,绘制了405 nm和520 nm指示光与单基发射药燃烧光谱对比图(图3),两指示光中心波长与单基发射药燃烧特征谱段未重叠,确定405、

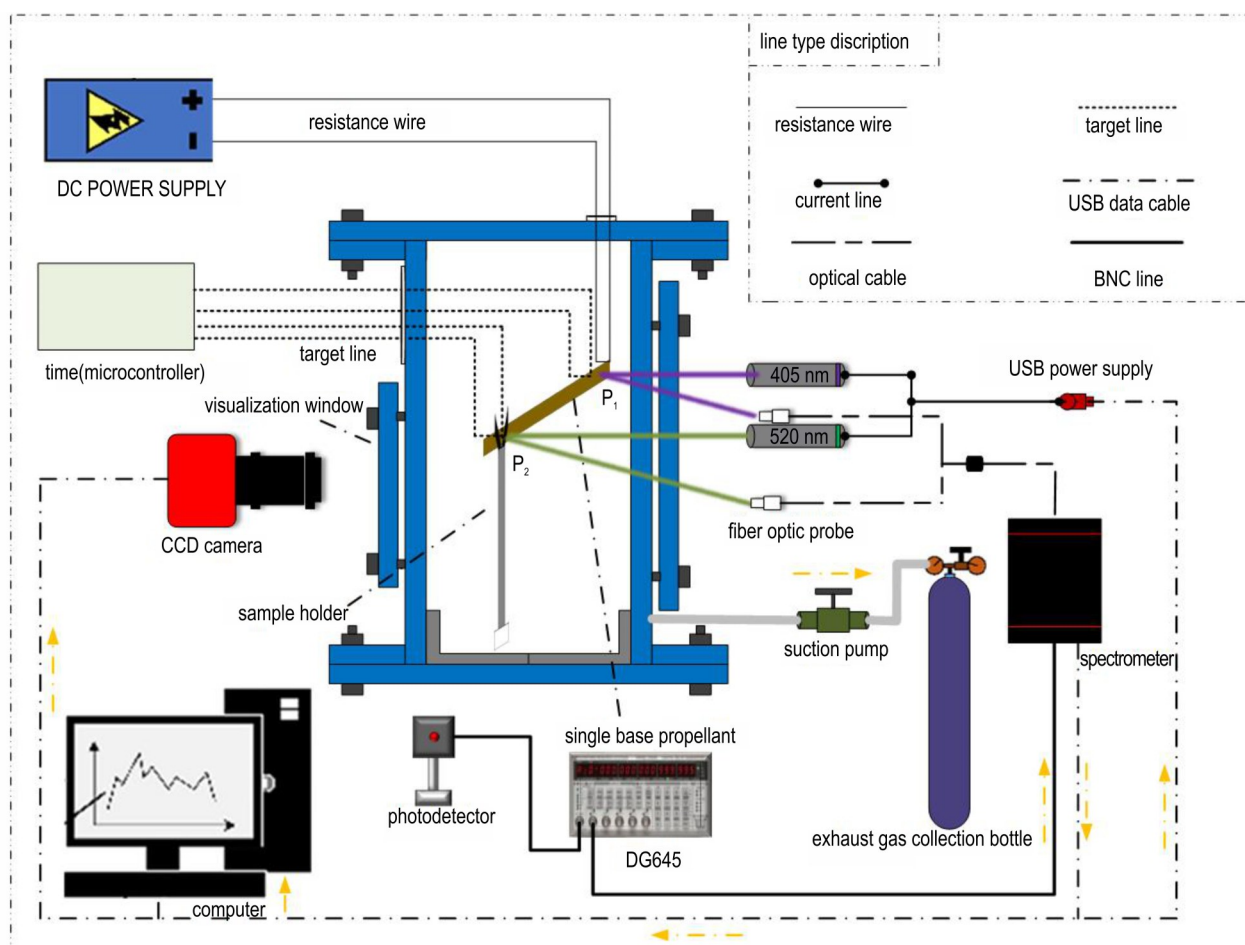


图1 单基发射药燃烧性能多参量测试系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi parameter testing system for single base propellant combustion performance

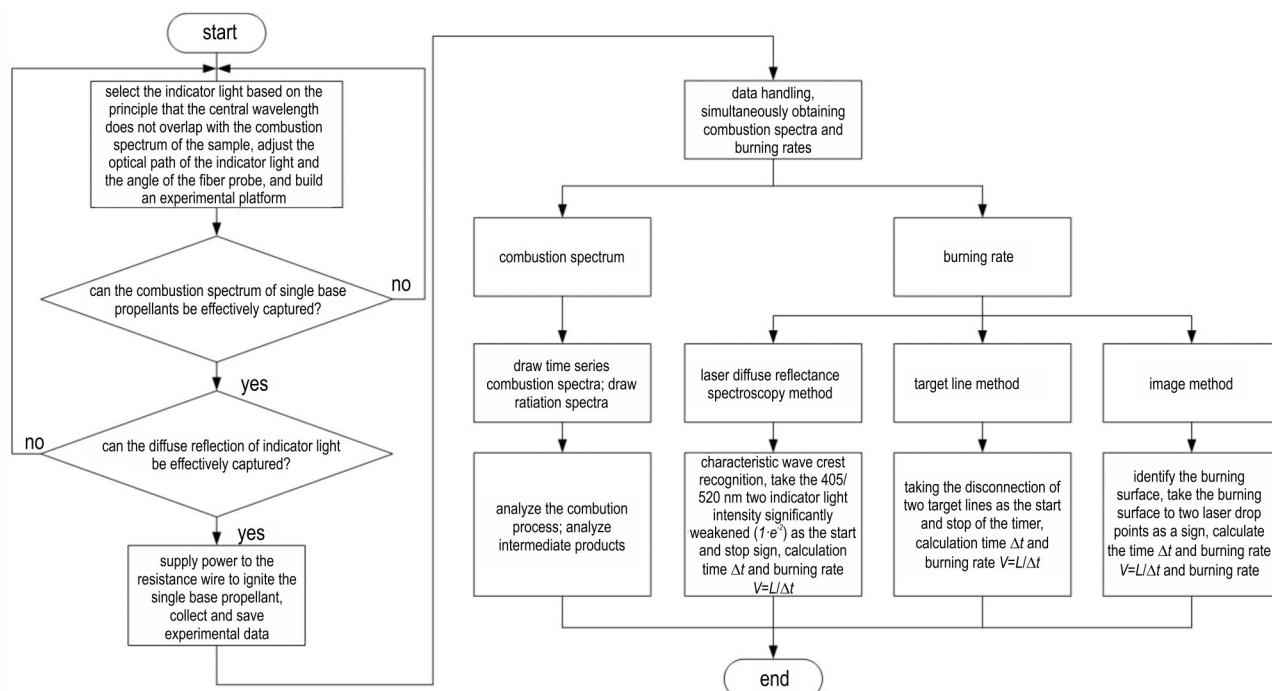


图2 单基发射药燃烧性能测量调试流程图

Fig.2 Flowchart for measuring and debugging the combustion performance of single-base propellant

520 nm 可作为其燃速测量的指示光。然后调整指示光光路以及光纤探头角度(满足指示光准确照射在发射药的 P_1 和 P_2 处, 光纤探头与指示光路形成 $30^\circ \sim 50^\circ$ 夹角, 能捕捉到漫反射光)。最后, 对光谱仪进行参数设置, 积分时间设置为 5 ms, 平均次数为 1, 且设置外部触发, 一次外部触发使得光谱仪连续扫描 400 次, 点燃发射药, 通过光谱手段同时获取燃烧光谱和燃速。

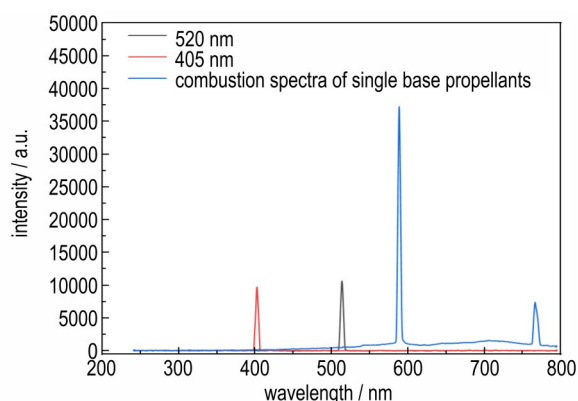


图3 指示光光谱与单基发射药燃烧光谱对比图

Fig.3 Comparison chart of indicator light spectrum and single base propellant combustion spectrum

燃烧光谱的获取: 先绘制时间序列光谱图, 分析单基发射药整体燃烧过程, 然后具体分析单个辐射光谱, 探寻中间产物。燃烧速度的测量采用激光漫反射光谱法, 进行特征波峰识别, 以 405 nm 和 520 nm 两指示光强大幅衰减 ($1/e^2$) 作为启停标志, 计算时间 Δt 。衰减标准基于高斯光束的性质而定, $1/e^2$ 是高斯光束光强分布的一个自然特征点, 这个位置光强显著衰减, 可以认为是光束的有效边界, 定义为光斑半径^[16-17]。靶线法以两根靶线的断开作为定时器的启停, 计算时间 Δt ; 图像法通过燃面识别, 以燃面燃烧到两个激光落点

作为基准, 计算时间 Δt ; 三者同时获取燃速 $V = \Delta L \cdot \Delta t^{-1}$, 相互验证。

1.4.2 单基发射药燃烧光谱与燃速同步测试

基于激光漫反射光谱测量方法, 以光谱手段表征单基发射药固定长度所需的燃烧时间, 实现单基发射药燃烧光谱与燃速的同步测试。同时搭建图像法以及靶线法测量装置与激光漫反射光谱法形成对比, 三者同步获取燃速。

单基发射药燃烧性能测量装置时序如图 4 所示, 启动直流稳压电源开关(15 V、3 A)点燃发射药, 光电探测器通过光电效应将发射药燃烧瞬间产生的辐射光转换为电流信号, 通过 BNC 线传输到示波器, 历经上升沿时间 t_{r1} 后触发输出为标准的电平信号, 传输到 DG645(延迟发生器)的外部触发端, 经上升沿时间 t_{r2} 后 DG645 被触发, 输出系列脉冲(脉冲宽度 30 ms, 数量为 1), 传输信号到光谱仪及相机外部触发段。经上升沿时间 t_{r3} 后触发光纤光谱仪连续扫描 400 次, 实时保存光谱数据, 激光漫反射光谱法根据发射药燃烧到 P_1 和 P_2 时 405 nm 和 520 nm 特征波峰大幅衰减至消失的标志计算时间; 经上升沿时间 t_{r4} 输出到彩色相机的外部触发端, 触发彩色相机连续拍照, 同理图像法根据发射药燃烧到 P_1 和 P_2 之间间隔的拍照数以及相机帧率计算时间; 最后靶线法的核心器件计时器根据发射药燃烧到 P_1 时烧断靶线 1 开启计时, 燃烧到 P_2 时烧断靶线 2 停止计时。三种方法同时获取到发射药燃烧到 P_1 和 P_2 之间所需的时间, 计算出三种方法测量的燃烧速度, 相互对比验证, 且激光漫反射光谱法是利用光谱手段获取到的燃速, 同时也记录了发射药的燃烧光谱, 因此也实现了单基发射药燃烧光谱与燃速的同步测试。

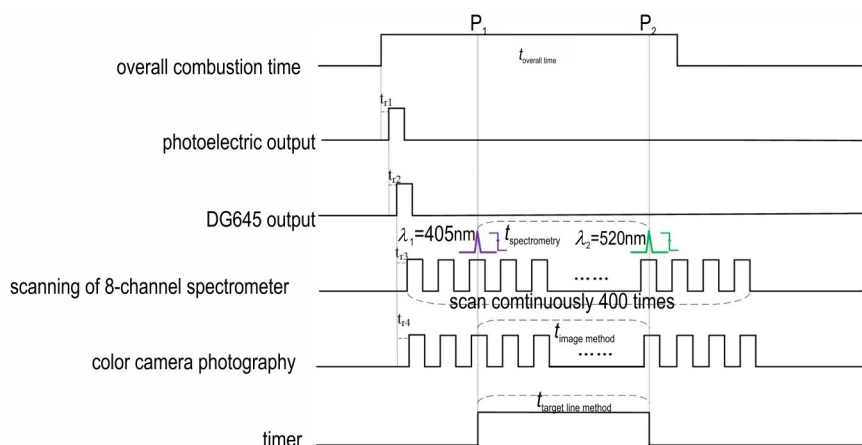


图4 单基发射药燃烧性能测量装置时序图

Fig.4 Time sequence diagram of single base propellant combustion performance measurement device

2 结果与讨论

2.1 单基发射药燃烧光谱特性

单基发射药的燃烧分为:点火阶段、扩散阶段、稳定燃烧阶段和熄灭阶段^[18]。本研究宏观分析彩色相机记录的燃烧过程与现象,如图5所示。

由图5a可见,在单基发射药的点火阶段,电阻丝加热样品,促使与电阻丝接触的部分先达到着火点,0~211.8 ms可以看到,最初只有与电阻丝接触的局部区域产生小火星,这是由于单基发射药燃烧表面反应区分解产生气体,将点燃的固体颗粒吹起所致。由图5b

可见,随着热量的积累,局部温度逐渐升高,燃烧开始在该区域蔓延^[18]。进入扩散阶段后,火焰从局部逐渐扩散到整个燃面。从497.5~1517.2 ms,火焰宽度和高度逐渐增加,表明燃烧强度在增强。随后,单基发射药进入稳定燃烧阶段,从2068.9~4000.0 ms,火焰形状在不断变化,但火焰更加明亮和集中,表明燃烧反应已经趋于稳定,且在2068.9 ms时火焰燃面到达 P_1 ,在3758.6 ms火焰燃面到达 P_2 ,以此作为图像法计时始末。最后,单基发射药进入熄灭阶段。从4000.0~6000.0 ms,火焰逐渐减弱并最终熄灭。在这个阶段,燃烧产生的热量不足以维持进一步的燃烧反应,火焰逐渐缩小并最终消失。

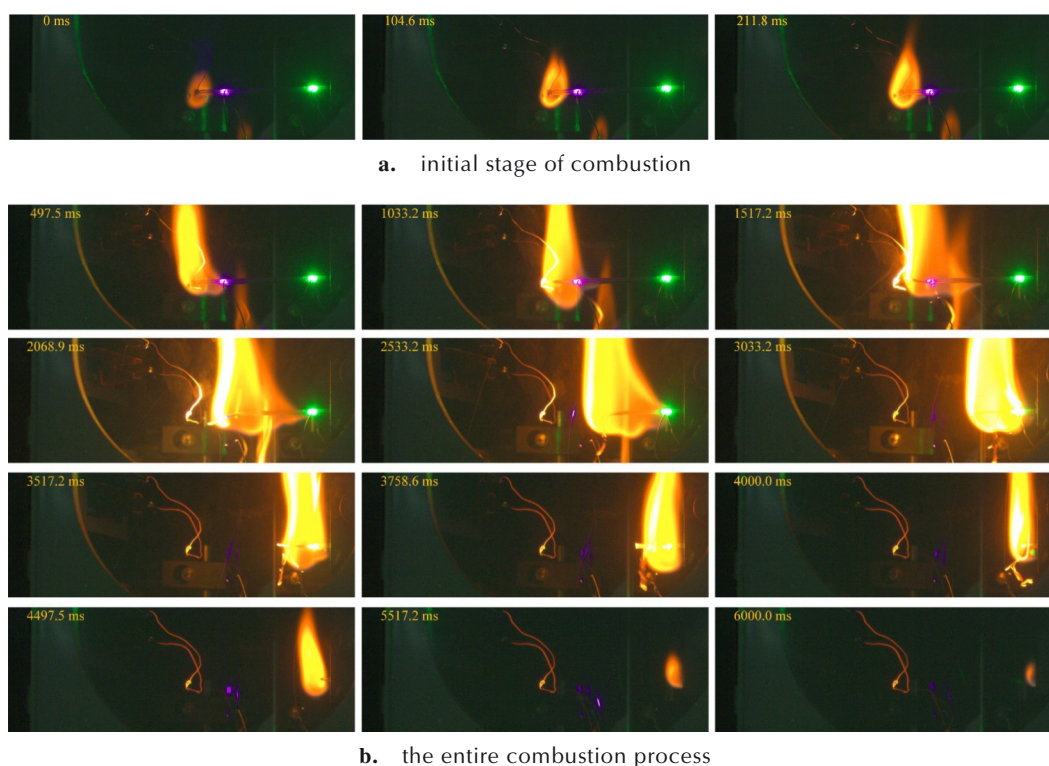


图5 单基发射药燃烧过程

Fig.5 Combustion process of single base propellant

以光谱手段对单基发射药的燃烧过程进行表征,单基发射药燃烧时间序列光谱图如图6所示。在整个燃烧过程中燃烧趋势展示为从弱到强,稳定然后又衰减,具体表现为单基发射药成分中 Na^* 、 K^* 、 Ca^* 等金属离子特征波峰辐射强度变化,与发射药燃烧趋势一样呈先上升再稳定,最后衰减。根据两指示光中心波峰的衰减状态将燃烧过程分为三个阶段。图6中整体光谱强度突然增强(出现白色区域)的6张谱图,分析原因是燃烧产生的烟雾颗粒造成漫反射大幅增强导致。

根据两指示光中心波峰的衰减状态将整个过程分

为三个阶段,具体代表谱图如下图7所示。燃烧初期(图7a):从点燃至燃烧到 P_1 (0~1429.2 ms),对405 nm和520 nm指示光的漫反射光均能有效捕捉表征,此时处于燃烧初期,因此 Na^* 、 K^* 金属对应的特征波峰强度相对较弱;燃烧中期(图7b):随着燃烧加剧,燃面从 P_1 燃烧到 P_2 (1429.2~3126.6 ms),光纤探头能有效捕捉到520 nm指示光的漫反射光,而405 nm指示光对应的特征波峰消失。 Na^* 、 K^* 金属对应的特征波峰强度大幅增强;燃烧后期(图7c):燃面从 P_2 燃烧到药条底部直至熄灭(3126.6~5563.1 ms),整体光谱强度逐

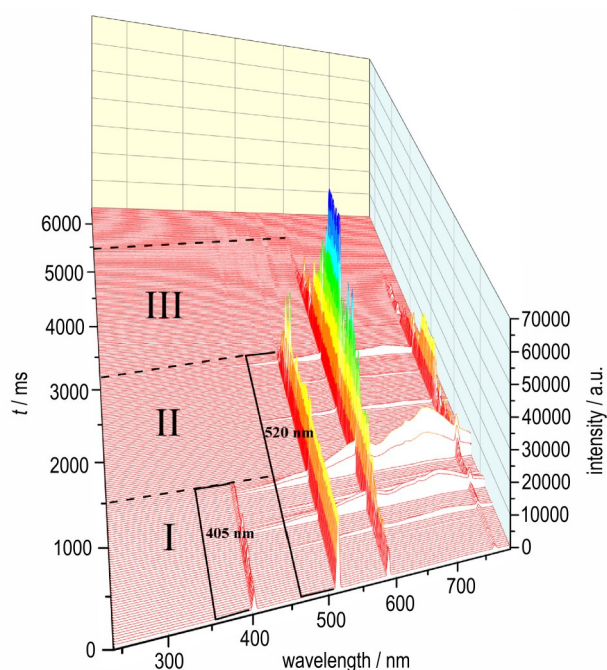


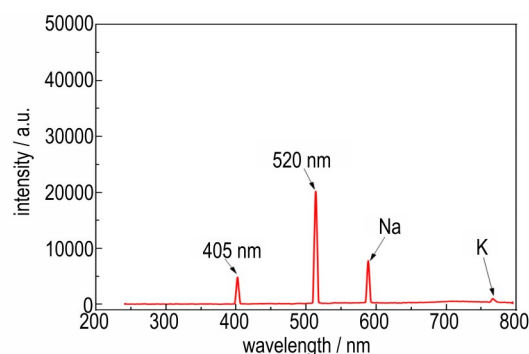
图6 单基发射药时间序列燃烧光谱图

Fig.6 Time series combustion spectrum of single base propellant

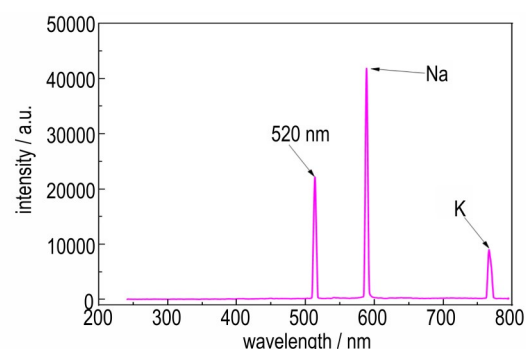
渐减弱,两波峰相较于单基发射药金属离子特征波峰的强度,基本可以忽略。

从单基发射药稳定燃烧阶段选择一张谱图数据进行绘图分析,如图8所示。单基发射药燃烧火焰的连续辐射很弱,仅在500~780 nm范围内存在较明显的金属离子的连续辐射,其原因是由于单基发射药中不可燃成分含量低,导致燃烧彻底,固体颗粒物少,减少了火焰的连续辐射。而其中405 nm以及520 nm左右产生的波峰,则是光谱仪对两个指示光的捕捉表征。

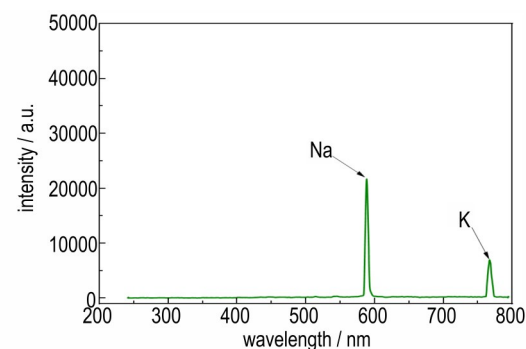
对单基发射药燃烧光谱中250~500 nm波段进行放大,进行特征波峰的识别。其中,313.9 nm对应OH*发射波峰^[19];337.3 nm对应NO发射波峰,其大量存在于单基发射药的燃烧反应区内,由硝酸酯分解和醛类放热反应生成,是单基发射药燃烧过程中的重要催化剂^[15]。386.8 nm对应CH*发射波峰,这一波段还有CN*,但强度更弱,被前者掩盖^[19];405.8 nm处是K*的发射峰,被405 nm指示光特征波峰大致掩盖。421.7 nm处对应CHO*发射波峰,主要出现在发射药的表面反应区,是由硝酸酯的分解反应、分解产物与未分解的硝酸酯再次反应产生^[14-15]。462.3 nm波峰对应CO₂*发射波峰,是CO燃烧火焰的产物,且CO也是硝化棉(NC)燃烧分解的重要中间产物,与NO发生还原反应生成了CO₂*^[15]。



a. initial stage of combustion



b. mid stage of combustion



c. late stage of combustion

图7 单基发射药阶段性代表光谱

Fig.7 Staged representative spectrum of single base propellant

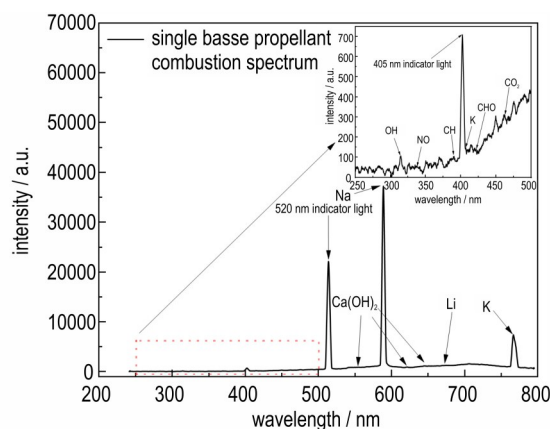


图8 单基发射药稳定燃烧辐射光谱强度曲线

Fig.8 Stable combustion radiation spectrum intensity curve of single base propellant

单基发射药燃烧光谱中 500~780 nm 波段辐射强度远大于 250~500 nm 波段,表明燃烧辐射能量主要集中在这一波段。在 588.7 nm 和 766.8 nm 表现出明显的特征波峰,分别对应 Na 和 K 外层电子跃迁发射的原子光谱^[15]。相较于其它原子光谱,其激发能量和温度条件都较低,发射峰强度也更高,强度受温度和含量的影响大^[20]。不同于自由基来自化学激发,Na 和 K 发射峰来自原子的热激发,与原子序数和温度密切相关,其辐射强度表征着燃烧过程中的温度信息^[21],为后续多光谱测温^[22]奠定基础。Ca(OH)₂ 的三个强度较弱的发射峰,依次对应应在 554.6, 621.9, 645.2 nm 处^[20],在 671.4 nm 还有金属 Li 的发射峰。单基发射药中的 Na, K, Ca 金属组分主要来自 NC 生产过程中残存的木质素,在单基发射药的实际生产过程中均不可避免^[14]。

值得注意的是,虽然在单基发射药辐射光谱谱段存在 OH*、CO₂*、CH*、CHO* 等自由基的特征峰,但相对于 Na*、K* 等金属离子特征峰而言强度很低,极易被忽视。因此可将 Na*、K* 的发射光谱作为单基发射药燃烧的标志,成为发射药生产和使用中的一种非接触式监测手段。

2.2 单基发射药燃烧速度

为获取单基发射药燃烧速度,本研究基于激光漫反射光谱测量原理^[19]搭建实验平台进行实验,实验结果与图像法、靶线法测量结果进行对比,验证激光漫反射光谱法的可行性及准确性。在成功测量单基发射药燃烧速度的基础上,将单基药换为双基发射药进行实验,验证激光漫反射光谱法测量燃速的普适性。

将 405 nm 和 520 nm 指示光实际测得的中心波峰(402 nm 和 513 nm)数据单独提取出来进行归一化绘图,具体如图 9 所示。X 轴对应时间,每个数据点的时间是根据单位时间内实际存储的谱图数,然后默认平均采集计算获取;以最大光强的 $1 \cdot e^{-2}$ 作为衰减标准找寻两波长光强开始衰减的时刻,如图 9 的 1429.2 ms 和

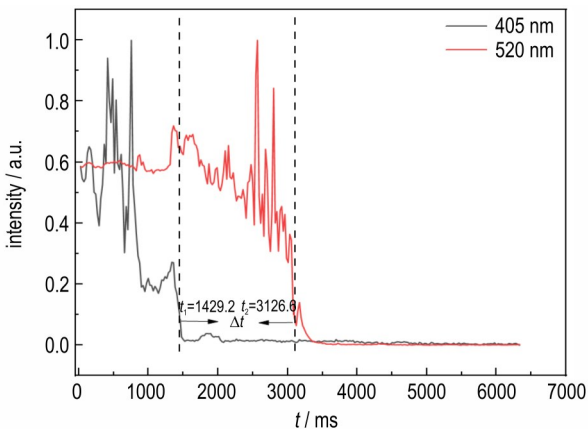


图 9 指示光光强衰减曲线图

Fig.9 Attenuation curve diagram of indicator light intensity

3126.6 ms 时刻,以两者之间的差值作为单基发射药固定长度 ΔL 所需的燃烧时间 Δt ,计算燃速 $V = \Delta L \cdot \Delta t^{-1}$ 。

利用激光漫反射光谱法、图像法和靶线法获取到单基药和双基药的燃速数据及相对误差,结果如表 1 表 2 所示。通过燃速平均值,计算标准差,绘制出单基发射药燃速误差棒图如图 10 所示。结合表 1 和图 10 可知,光谱法与靶线法测量燃速对比所得相对误差,均大于光谱法与图像法测量燃速的相对误差。分析可得,实验所用单基发射药打印工艺是从下往上层堆积的,整体呈梯形,底面很薄,导致底面薄边燃烧迅速,靶线偶尔会提前烧断,而内部中心位置尚未燃烧,使得靶线法记录的时间小于光谱法和图像法计算的时间,计算得到的燃速 4 次都大于其余两者。其次,所用测量仪器相机、光谱仪以及计时器等自身精度也会造成误差。整体而言,光谱法与图像法测量误差小于 4.17%,与靶线法测量误差小于 9.97%,且据图 10 显示光谱法测量燃速的不确定度在图像法与靶线法之间,表明该方法能够较为准确地测量单基发射药的燃烧速度。从表 2 可以看出,光谱法对双基发射药的燃速也能准确获取,可见,通过光谱法能够实现多种含能材料燃烧速度和光谱的同步测量。

表 1 单基发射药燃烧速度

Table 1 Combustion rating of single base propellant

experiment	burning rate / mm · s ⁻¹			relative error / %	
	laser diffuse reflectance spectroscopy method	image method	target line method	Spectral and image method	Spectral and target line methods
experiment 1	16.048	15.891	16.240	0.99	1.18
experiment 2	23.337	23.838	25.924	2.10	9.97
experiment 3	18.127	18.915	19.436	4.17	6.73
experiment 4	23.571	23.202	23.101	1.59	2.03
experiment 5	13.986	14.359	15.146	2.60	7.66

表 2 双基发射药燃烧速度

Table 2 Combustion rating of dual base propellant

experiment	burning rate / mm · s ⁻¹			relative error / %	
	laser diffuse reflectance spectroscopy method	image method	target line method	spectral and image method	spectral and target line methods
experiment 1	16.458	16.956	15.370	2.22	7.08
experiment 2	10.312	10.882	11.059	5.24	6.76
experiment 3	11.667	11.848	11.949	1.53	2.36
experiment 4	12.417	13.662	12.012	9.11	3.37
experiment 5	16.458	16.956	15.370	2.22	7.08

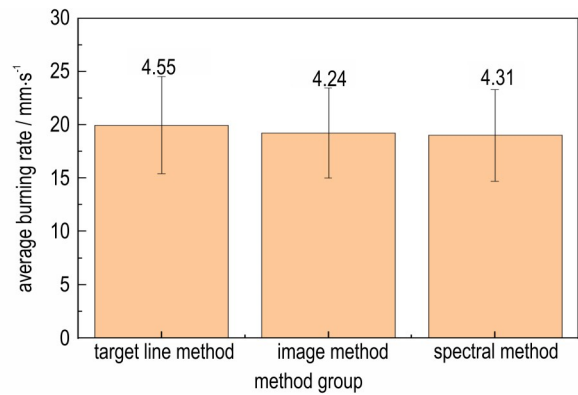


图 10 单基发射药燃烧速度误差棒图

Fig.10 Single base propellant combustion velocity error bar chart

3 结论

本研究提出一种基于激光漫反射光谱测量原理的燃烧速度测量方法,能够实现对单基发射药燃烧速度和燃烧光谱的同步获取。以此设计搭建发射药燃烧性能多参量测量系统,开展了单基发射药和双基发射药燃烧测量实验进行验证。

1) 燃烧光谱:首先综合单基发射药燃烧阶段所有光谱数据,构建单基发射药时间序列燃烧光谱图,整体分析其燃烧趋势。然后筛选稳定燃烧阶段某单个光谱,进行特征波峰识别,发现 OH*, CO₂*, CHO*等活性基团对应的强度较弱的特征峰,以及 Na, K, Ca等强度很大的金属发射峰,提出可将 Na*, K*, Ca*的发射光谱作为单基发射药燃烧的标志,作为一种非接触式监测手段提高生产、运输和存储发射药过程中的安全性。

2) 燃烧速度:以中心波长与样品燃烧谱段特征峰不重叠的原则选取两指示光,确定使用 405 nm 和 520 nm 激光二极管搭建基于激光漫反射光谱法的测速平台。比较光谱法测得燃速与图像法和靶线法测量结果,与图像法误差小于 4.17%,与靶线法误差小于

9.97%,且光谱法测量燃速的不确定度在图像法与靶线法之间;证明该方法能够实现对单基发射药燃烧速度的准确获取;然后开展了双基发射药燃烧实验,验证了激光漫反射光谱法的普适性。

参考文献:

[1] LIU Y, ZHENG W, WU Y, et al. Study on pyrolysis behaviors and characteristics, thermodynamics, kinetics, and volatiles of single-base propellant, a typical energy-containing material[J]. *Fire*, 2023, 6(10): 370.

[2] 侯龙. 基于详细化学动力学的富氮类发射药燃速预估研究[D]. 山西: 中北大学, 2024.

HOU Long. Nitrogen rich gun propellants based on detailed chemical kinetics research on burning rate prediction [D]. Shanxi: North University of China, 2024.

[3] NI H, FAN R, HU H, et al. Synchronized measurement method of burning rate and combustion temperature of a solid propellant specimen[J]. *Applied Optics*, 2024, 63(13): 3420–3429.

[4] HE W, LYU J Y, TANG D Y, et al. Control the combustion behavior of solid propellants by using core-shell Al-based composites[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 221: 441–452.

[5] CHEN S, TANG Z, TANG K, et al. Lowering the burning rate temperature coefficient of composite propellant by compensating its burning surface through thermal expansion and contraction in microstructure [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 494: 152800.

[6] AO W, LIU P, LIU H, et al. Tuning the agglomeration and combustion characteristics of aluminized propellants via a new functionalized fluoropolymer [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 382: 122987.

[7] AO W, FAN Z, LIU L, et al. Agglomeration and combustion characteristics of solid composite propellants containing aluminum-based alloys [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 220: 288–297.

[8] ZHANG W, XIONG K, FAN Z, et al. An experimental study of the combustion characteristics of novel Al/MOX/PVDF metastable intermixed composites[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 137: 108263.

[9] ZHAO S, LI G, WANG C. Bridge cable damage identification based on acoustic emission technology: A comprehensive review[J]. *Measurement*, 2024, 237: 115195.

[10] SHU Y, ZHANG W, FAN Z, et al. Improving the combustion efficiency and agglomeration of aluminum-water propellants via n-Al/CuO metastable intermolecular composites [J]. *Combustion and Flame*, 2024, 260: 113246.

- [11] 胡海航, 樊荣, 杨杨, 等. 基于蓝光阴影图像法的固体推进剂药条燃烧测量方法[J]. 固体火箭技术, 2023, 46(4): 644–652.
HU Hai-hang, FAN Rong, YANG Yang, et al. Measuring method for burning rate of solid propellant based on blue-light shadow image method[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2023, 46(4): 644–652.
- [12] LI L, INGABIRE C, LIANG D, et al. Comparative study on mechanical properties and combustion characteristics of additive manufacturing/casting composite solid propellants[J]. *Acta Astronautica*, 2025, 229: 43–54.
- [13] KUMAR P, VARSHNEY M, MANASH A. Combustion performance studies of aluminum and boron based composite solid propellants in sub-atmospheric pressure regimes [J]. *Propulsion and Power Research*, 2019, 8(4): 329–338.
- [14] 侯鹏飞, 潘仁明, 朱日宏, 等. 典型单基发射药和双基发射药燃烧火焰辐射特性[J]. 含能材料, 2023, 31(9): 910–916.
HOU Peng-fei, PAN Ren-ming, ZHU Ri-hong, et al. Combustion radiation characteristics of typical single-base propellant and double-base propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(9): 910–916.
- [15] WANG L, SUN H, LI Q, et al. Exploration of the combustion characteristic based on the pyrolysis and combustion spectral analysis of single base propellant [J]. *Thermochimica Acta*, 2025, 743: 179901.
- [16] 王涛, 吴福全, 马丽丽, 等. 尼科耳棱镜对单模高斯光束光强分布的影响[J]. 物理实验, 2008, 28(4): 1–5.
WANG Tao, WU Fu-quan, MA Li-li, et al. Effect of nicol prism on the intensity distribution of single-mode gaussian light beam[J]. *Physics Experiment*, 2008, 28(4): 1–5.
- [17] 黄水平. 一种同时测量高斯光束束腰位置和半径的新方法[J]. 物理与工程, 2017, 27(4): 30–33.
HUANG Shui-ping. A new method for simultaneously measuring gaussian beam waist position and radius [J]. *Physics and Engineering*, 2017, 27(4): 30–33.
- [18] 侯鹏飞. 固体火药燃烧火焰光谱特性实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
HOU Peng-fei. Experimental study on combustion radiation characteristics of solid propellant [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2023.
- [19] 唐洪昌, 李瑜, 张昌华. 三乙胺火焰特征光谱分析[J]. 光散射学报, 2024, 36(2): 179–183.
TANG Hong-chang, LI Yu, ZHANG Chang-hu. Flame characteristic spectral analysis of triethylamine [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2024, 36(2): 179–183.
- [20] 郭校绪, 潘科玮, 侯龙锋, 等. 固体火箭发动机羽流辐射光谱测温方法研究(英文)[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(1): 305–311.
GUO Xiao-xu, PAN Ke-wei, HOU Long-feng, et al. Research on radiation spectroscopy thermometry of plume of solid rocket moto [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(1): 305–311.
- [21] 李彦. 原子发射光谱双谱线法测量火工药剂燃烧温度[D]. 山西: 中北大学, 2015.
LI Yan. Flame temperature measurement of pyrotechnics using atomic emission two-line method [D]. Shanxi: North University of China, 2015.
- [22] LI K, YAN W, HUANG X, et al. In-situ measurement of temperature and potassium concentration during the combustion of biomass pellets based on the emission spectrum [J]. *Fuel*, 2021, 289: 119863.

Synchronous Measurement Method for Combustion Rate and Spectral Characteristics of Single Base Propellant

LI Zheng-xi¹, WU Zhi-xiang¹, SHEN Jin-peng², FU Zhuo-jiang², LI Wei-yi¹, HUANG Zi-wen¹, CAO Yun-bin¹, SHANG Li-ping^{1,3}, DENG Hu¹

(1. School of Information and Control Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. State Key Laboratory for Environment-friendly Energy Materials, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 3. Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In this study, to gain deeper insight into the combustion characteristics of single-base propellant, a multi-parameter measurement system based on laser diffuse reflection spectroscopy was developed. This system was employed to measure the combustion parameters of both single-base and double-base propellants. As a result, the combustion spectra and burning rates of both propellant types were successfully obtained. The experimental results revealed that within the 250–500 nm wavelength range, emission peaks of OH*(313.9 nm), CO₂*(462.3 nm), and CHO*(421.7 nm) were observed, attributed to the active intermediates generated during single-base propellant combustion. Meanwhile, in the 500–780 nm range, distinct emission peaks of Na*(588.7 nm), K*(766.8 nm), and Ca*(554.6 nm) were detected, analyzed to originate from residual lignin in nitrocellulose. Compared with the burning velocity measurement results from the image and target line methods, the laser diffuse reflection spectroscopy method showed consistent results, with maximum relative errors of 4.17% and 9.97%. Furthermore, the results from double-base propellant combustion parameter measurements indicated that this method is also applicable for the simultaneous measurement of combustion velocity and spectra of double-base propellants. The developed method possesses feasibility and versatility, enabling non-contact and non-destructive measurement of propellant burning velocity.

Key words: single base propellant; combustion spectrum; combustion rate; laser diffuse reflectance spectroscopy measurement method

CLC number: TJ55;TH744

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025078

Grant support: National Natural Science Foundation of China (No. 22275150); Xi'an Institute of Modern Chemistry Open Fund (SYJJ20210411)

(责编: 高毅)