

文章编号:1006-9941(2023)09-0910-07

典型单基发射药和双基发射药燃烧火焰辐射特性

侯鹏飞¹,潘仁明¹,朱日宏²,李方欣²,葛瑞荣³

(1. 南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094; 3. 安徽红星机电科技股份有限公司, 安徽 合肥 231135)

摘要: 为了探究单基发射药和双基发射药燃烧的火焰辐射特性以指导抑爆系统探测器的设计,设计并搭建了发射药燃烧火焰光谱测试系统,测试分析了空气氛围不同压力条件(-0.05,0,0.20 MPa)下典型单基发射药“20/7”和双基发射药“双芳-3”试样燃烧时的火焰辐射光谱。结果表明:常压条件下,“20/7”单基药仅在550~650 nm波段看到较弱的连续辐射光谱,观测到OH*, C₂*和CHO*的发射峰,在燃烧火焰区可能存在这些活性中间体。“双芳-3”双基药燃烧火焰中固体颗粒物含量多,在200~1700 nm波段内可见连续辐射光谱,其辐射强度大于“20/7”单基药,掩盖了这一波段部分发射峰信息,但在1000~1700 nm波段,采集到CN*, OH*等基团的发射峰。2种发射药的火焰光谱中存在很强的Na*, K*, Ca*的发射峰,推测源自硝化棉中残留的木质素。增大燃烧室压力,2种发射药燃烧辐射强度增大。低压条件下,在双基药燃烧初期连续光谱较弱,辐射光谱类似于单基药。根据测试结果,针对“20/7”单基药的探测器应主要依据Na和K的发射峰设计,而针对“双芳-3”双基药的探测器应主要依据连续光谱峰值波长设计;使用环境压力越高,探测器触发阈值要求越低。

关键词: 发射药;燃烧;火焰辐射;光谱特性;压力**中图分类号:** TJ55; X93**文献标志码:** A**DOI:**10.11943/CJEM2022247

0 引言

含有亚稳态能量基团的发射药在生产、储存等过程中易发生燃爆事故^[1-3],需安装抑爆系统加以控制。目前发射药抑爆系统的首选探测方法是能实时探测发射药起火的光学探测法^[4]。光学探测是对发射药燃烧火焰的光辐射响应,光学探测器在实际应用中普遍存在系统误启动或不启动的问题,严重影响了系统的可靠性,其原因在于设置的光谱波长与强度范围过于宽泛,没有结合发射药的燃烧辐射特性来设计制作光学传感器。

现有的针对发射药等含能材料燃烧火焰光谱特性的研究较少。Yang等^[5]提出一种基于氮离子发射光

谱的温度诊断技术,对几种推进剂的燃烧火焰光谱进行了研究,计算的最高温度与热电偶温度相匹配,发现暗区的存在。Sheehe等^[6]为了掌握硝基甲烷燃烧过程的化学动力学特点,对氧化铝灯芯上燃烧的硝基甲烷火焰进行了可见-近红外光谱采集,确定了硝基甲烷-空气燃烧过程中存在的瞬态基团,包括HNO*, CN*, NO₂*, CH*, OH*, NH*等活性基团。程和平^[7]测量了在264~650 nm波长范围内真空石英管中黑索今爆炸的辐射能量,指出黑索今爆炸过程中辐射能量大小与其质量呈负指数关系。Yuan等^[8]研究了Al/高氯酸铵/端羟基聚丁二烯推进剂紫外-近红外波段的燃烧火焰光谱,采集到Al, Na, K, Ca, Li等金属原子的发射光谱。周禹男等^[9]研究了在推进剂中常用的3种铝颗粒的火焰光谱,发现火焰的光谱强度与样品的粒径、燃烧环境的氧化性有关,粒径越小,光谱强度越大;燃烧环境的氧化性越强,点火延迟时间越短,光谱强度也越大。苑继飞等^[10]采集了铝粉和黑索今混合物燃烧火焰的辐射光谱,观察到明显的AlO的发射光谱,因黑索今含量太少未观测到CN*和OH*发射光谱。以

收稿日期: 2022-10-07; **修回日期:** 2022-11-27**网络出版日期:** 2023-06-30**作者简介:** 侯鹏飞(1998-),男,硕士研究生,主要从事火炸药燃烧火焰方面的研究。e-mail: 819976860@qq.com**通信联系人:** 潘仁明(1963-),男,研究员,主要从事含能材料方面的研究。e-mail: panrenming@163.com**引用本文:** 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.

上研究主要集中在含能材料火焰温度、辐射基团等方面的研究,缺少利用发射药燃烧辐射特性指导光学探测器设计的针对性研究。

根据溶塑火药燃烧理论^[11],发射药燃烧各反应区域中发生不同化学反应,各区的温度和燃烧产物存在明显差异导致燃烧辐射特性不同,而燃烧辐射特性,尤其是常压燃烧火焰辐射特性,蕴含着燃烧过程的大量信息,是发射药火灾光学探测的基础。因此,需要设计针对性的发射药火焰光谱实验系统对不同类型的发射药进行燃烧火焰光谱测试,为光学探测器的设计提供依据。

单基发射药和双基发射药是常见的发射药,生产储存过程中易引发事故^[3],是发射药安全关注的重点领域。光学探测器在发射药燃爆灾害探测时,其应用场景主要为生产和储存时的发射药火灾探测,此时空气为助燃剂,环境压力通常为常压,但发射药成品或半成品处在相对封闭空间(一般会配置泄压口)时,其环境压力可能会高于大气压力,而根据溶塑火药燃烧理论,压力不同,发射药燃烧反应的进程不同,造成燃烧辐射的差异。鉴于此,本研究选择了空气气氛下低压、常压、较高压等工况,设计并搭建了发射药火焰光谱实验系统,开展空气气氛下不同压力条件下的典型单基发射药“20/7”和双基发射药“双芳-3”燃烧试验,利用光纤光谱仪和光谱分析仪采集燃烧火焰辐射光谱,分析燃烧过程的光谱和光强特征,为发射药火灾探测器的设计积累基础数据。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

“20/7”单基药粉,泸州北方化学工业有限公司;“双芳-3”吸收药,山西北方兴安化学有限公司;丙酮、无水乙醚,分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司。无水

酒精,分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

JH-500型捏合机,上海红星化工机械厂;ZJB-30型油压机,天津市第二锻压机床厂;AHX安全型水浴烘箱,南京理工大学机电厂。FLA4000+光纤光谱仪,杭州晶飞科技有限公司,分辨率0.1 nm;横河IMAQ6370C光谱分析仪,深圳集源科技有限公司,信号采集光纤的纤芯/包层直径为400/440 μm ,数值孔径为0.2。

1.2 样品制备

采用半溶剂法^[12]工艺用粉碎的“20/7”单基药粉和“双芳-3”吸收药制备试样。单基药药柱:柱状,直径8.4 mm,长度16 mm,质量1.5 g。双基药药柱:管状,外径6.0 mm,孔径1.9 mm,长度16 mm,质量1.1 g。实验前在45 $^{\circ}\text{C}$ 下将药柱烘干24 h,去除其中水分。

1.3 实验系统

发射药火焰光谱实验系统如图1所示。燃烧室内部尺寸为300 mm \times 300 mm \times 300 mm,正面为一方型JGS2紫外光学石英玻璃视窗,在紫外-近红外波段有良好的透光率。燃烧室上方外接上海笠聚的YN100BF型压力表,量程-0.1~2.4 MPa,精度等级1.6级。采用2台不同波段的光谱仪采集火焰辐射光谱,光谱仪前端接准直镜,FLA4000+光纤光谱仪准直镜距药柱中轴线垂直距离30 cm,光谱采集范围200~1100 nm,积分时间5 ms;IMAQ6370C光谱分析仪前端距药柱中心轴线垂直距离20 cm,光谱采集范围1000~1700 nm。

1.4 实验过程

采用镍铬合金电阻丝点火。电阻丝两端接金属重物,质量均为20 g,悬挂于两端电极上,电阻丝紧压接触试样上表面。在电极两端施加20 V电压,电阻丝发热升温点燃药柱。药柱点燃后,利用高温熔断电阻丝原理,依靠重物重力将断开的电阻丝拉离燃烧区域,防

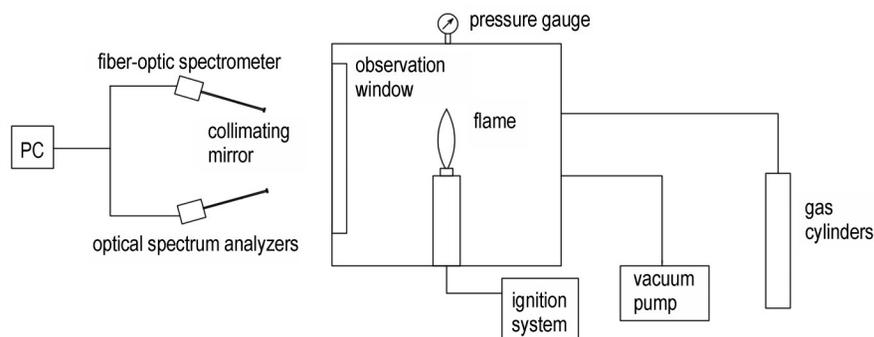


图1 发射药火焰光谱实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental system for propellant flame spectrum collection

止对火焰流场的干扰和电阻丝高温发光对光谱测量带来干扰, 点火系统如图2所示。

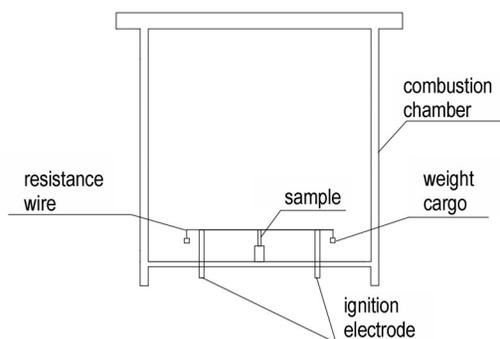


图2 点火系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of ignition system

首先将试样安装在样品架上, 连接点火电阻丝, 检查导通合格后待命; 关闭燃烧室; 用真空泵将燃烧室抽成真空后, 将高纯空气通入燃烧室至实验压力; 打开光纤光谱仪进行连续的光谱采集; 迅速点火, 试样开始燃烧, 当火焰稳定时, 打开光谱分析仪进行火焰光谱测试; 试样燃烧完毕后关闭光纤光谱仪和光谱分析仪。同一实验条件, 重复3次测试。实验前采集背景光谱, 并将背景光谱从发射药的燃烧光谱中去除。

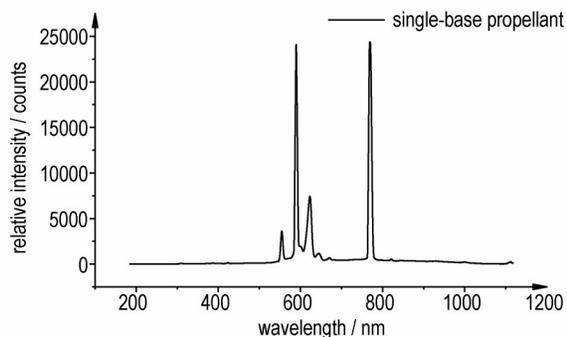
为减少环境光对测试的干扰, 测试发射药燃烧火焰光谱时, 燃烧室周围布置黑色吸光幕布。

研究压力对发射药燃烧火焰光谱影响时, 设置的压力值分别为-0.05, 0, 0.20 MPa(表压), 充压气体为高纯空气。

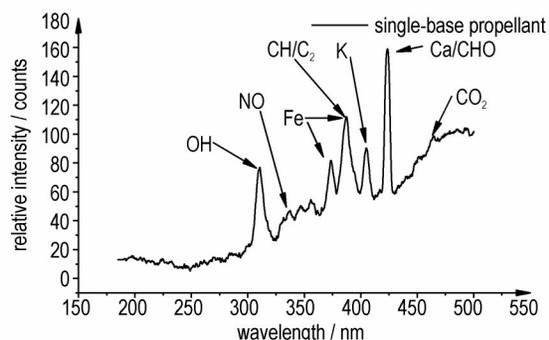
2 结果与讨论

2.1 常压下单基药的燃烧火焰辐射特性

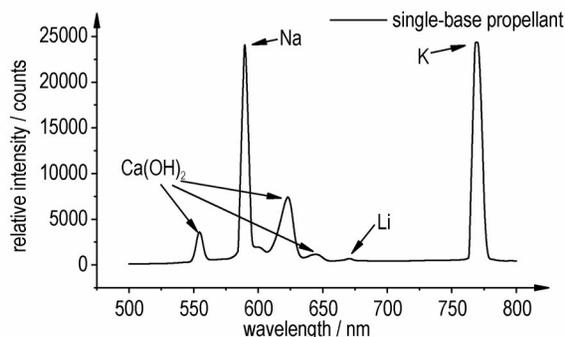
为研究单基发射药常压条件下的燃烧辐射特性, 对典型单基药“20/7”进行了燃烧光谱采集, 结果如图3所示。由图3a可以看出, “20/7”单基药燃烧火焰的连续辐射很弱, 仅在550~650 nm范围内存在较弱强度的连续辐射, 这可能是由于“20/7”单基药中非可燃组分含量低, 燃烧充分, 产生的碳粒等固体颗粒物少。将图3a分解为图3b(200~500 nm), 图3c(500~800 nm), 图3d(800~1100 nm)。图3b中辐射光谱强度最低。其中, 310.6 nm附近是 $\text{OH}^*(A^2\Sigma^+ - x^2\Pi)$ 发射峰; 337.5 nm处对应 $\text{NO}(B^2\Pi - x^2\Pi)$ 谱带, NO 大量的存在于“20/7”单基药的燃烧反应区内, 主要由硝酸酯和醛类放热反应生成。373.3 nm处是 Fe 的发射峰; 387.3 nm对应 $\text{CH}^*(B^2\Sigma^- - x^2\Pi)$ 谱带, 这一波段还



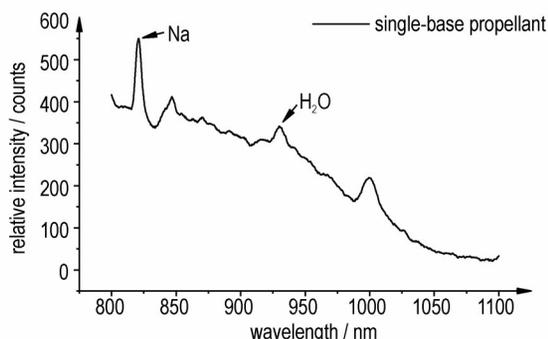
a. 200-1100 nm



b. 200-500 nm



c. 500-800 nm



d. 800-1100 nm

图3 单基药稳定燃烧辐射光谱强度曲线

Fig.3 Curves of radiative spectral intensity obtained for a single-base propellant at stable combustion

有 $\text{CN}^*(B^2\Sigma^+ - x^2\Sigma^+)$, 但会被前者掩盖, 同时, Fe 在这一波段也有明显的特征峰, 所以这一波段更可能是几种发射峰的叠加; 404.4 nm 处是 K 的发射峰, 相较于 766.5, 769.9 nm 的主峰更难激发, 且强度较弱。424.6 nm 处对应了 $\text{CHO}^*(^1A'' - ^1A_1)$ 谱带, 生成 CHO^* 的反应主要位于发射药的表面反应区, 可能是由硝酸酯的分解反应、分解产物与硝酸酯的反应和初始产物之间的反应产生, 但是这一波段附近还可能存在 Ca 的发射峰。464.1 nm 谱峰属于 $\text{CO}_2^*(^1B_2 - x^1\Sigma_g^+)$ 谱带, 这在 CO 火焰中常见, 而 CO 也是硝化棉 (NC) 燃烧分解的重要中间产物。此外, 在“20/7”单基药燃烧过程中, 一些波段存在偶然出现的发射峰, 包括 330.2 nm 处的 Na 发射峰, 体现了燃烧反应的复杂性和不稳定性。样品中的 Na, K, Ca 和 Fe 金属组分主要来自 NC 生产过程中残存的木质素, 在 2 种发射药的实际生产过程中均不可避免少量存在。在 200~500 nm 波段采集到大量特征峰, 可以提高探测识别的可靠性, 但强度弱不能提高探测灵敏度。

图 3c 中记录的 500~800 nm 波段燃烧辐射的强度远大于另外 2 个波段, 表明“20/7”单基药燃烧辐射能量主要集中在这一波段。“20/7”单基药的火焰光谱在 589 nm 和 768 nm 附近有很强的线光谱, 这主要是金属 Na 和 K 外层电子跃迁发射的原子光谱^[13]。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。不同于自由基来自化学激发, Na 和 K 发射峰主要由原子的热激发形成, 与原子序数和温度密切相关, 包含了燃烧过程温度的信息^[14]。同时, 在这个波段中, 也存在源自 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的 554.4, 622.9, 645.3 nm 处较弱的发射峰。在 500~800 nm 波段的特征峰明显缺乏特异性, 但强度高适用于提高探测器灵敏度。

图 3d 记录的 800~1100 nm 波段存在大量的谱峰, 其中易于分辨的是 821 nm 处 Na 的发射峰和 930 nm 附近 H_2O 的振动-转动峰, H_2O 是燃烧反应区的重要产物。单基药火焰区主要反应之一^[11]: $2\text{NO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ 。这其中就伴随着大量 H_2O 和多种发射基团的产生, 在其它的燃烧反应区和环境中的 H_2O 也可能会进入火焰区。

在 1000~1700 nm 波段未采集到“20/7”单基药燃烧辐射光谱, 最有可能的原因是“20/7”单基药在这一波段的辐射强度低于光谱仪响应下限, 表明针对这一波段的探测器并不适用于“20/7”单基药。

需要注意的是, 虽然 OH^* 、 C_2^* 、 CH^* 、 CHO^* 等自

由基的峰出现在辐射光谱中, 但是相对于 Na 和 K 的峰而言强度很弱, 易被忽视且大量金属的发射峰会掩盖它们的信息。

“20/7”单基药的燃烧辐射以 Na 和 K 的发射峰为主, 其它波段的辐射强度明显偏弱, 所以针对此类发射药的探测器设计时主要应参考 Na 和 K 的发射光谱以提高灵敏度, 并考虑一般火焰中不常见的其它基团的发射光谱以提高探测可靠性。

2.2 常压下双基药的燃烧火焰辐射特性

为研究双基发射药常压条件下的燃烧辐射特性, 对典型双基发射药“双芳-3”进行了燃烧光谱采集, 结果如图 4 所示。

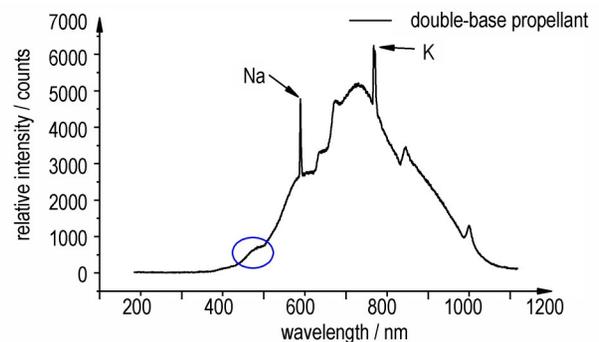


图 4 双基药稳定燃烧辐射光谱强度曲线

Fig.4 Curves of radiative spectral intensity obtained for the double-base propellant at stable combustion

由图 4 可以看出, “双芳-3”燃烧发射光谱强度在 200~400 nm 范围内很弱, 强度接近于环境的背景辐射, 没有明显的特征峰。400~728 nm 范围内, 波长增加, 发射光谱强度逐渐变强, 并伴随一些特征峰的出现。在 728~1100 nm 范围内, 发射光谱强度总体上在逐渐减弱。除 Na 和 K 辐射的线状光谱外, “双芳-3”燃烧光谱中有强烈的连续辐射。连续光谱为燃烧过程中固体颗粒在高温下产生的热辐射, 表明在“双芳-3”燃烧的火焰区可能包含大量的固体颗粒物, 这主要是由于燃烧表面反应区产生的气体把燃烧表面的固体颗粒带入, 还有一部分是燃烧反应产生的碳黑。碳黑的形成可能是由于燃烧表面反应区和暗区产生的有机质进入火焰区生成大量的碳, 在此温度下, NO 也会与碳迅速反应, 温度升高和氧气不足都会促进碳黑的生成。固体颗粒物在燃烧过程中急速升温, 放出辐射, 当这些颗粒物浓度足够大时就会出现黑体的特征。“双芳-3”双基药比“20/7”单基药有更强的连续辐射, 表明其常压燃烧过程氧化剂含量不足的情况更严重, 燃烧更不充分。400~500 nm 波段可以看到小的凸起, 这可能

是CO氧化过程产生的激发 CO_2^* 的连续发射光谱, CO是双基药燃烧过程中的重要中间产物, 充斥在燃烧区, CO_2^* 辐射通常被认为在一个宽波段内保持不变^[15-16]。连续光谱会掩盖强度较弱的光谱, 特别是分子光谱, 使得许多化学信息难以分辨。

在200~1100 nm波段, OH^* , C_2^* , CH^* 是在化学反应动力学中常见的自由基。 OH^* 的主要波长为: 281.1, 306.4, 309.0, 312.2, 347.2 nm, 其中在306 nm处的峰值最为显著; C_2^* 的强特征谱带为swan系统谱带, 主要波长为: 469.7, 471.5, 516.5, 558.5, 563.5 nm; CH^* 的431.5 nm和390.0 nm谱带在火焰中也很常见; 而 H_2O 分子的振动-转动光谱也具有强烈的谱带强度, 在651.7, 927.7 nm处有强的发射或者吸收峰^[13], 这些都是燃烧反应中常见的发射基团。但是在“双芳-3”的燃烧过程中的200~1100 nm波段却难以辨识。可能的原因一是燃烧过程中生成的发射基团浓度较低; 二是在火焰中存在的时间过短, 光谱仪难以记录; 三是相对于强大的连续辐射, 它们的强度过低, 被掩盖。

为探究双基药在1000~1700 nm波段的辐射特性, 采用横河IMAQ6370C光谱分析仪对“双芳-3”双基药的燃烧火焰光谱进行了采集, 结果如图5所示。由图5可以看出, 在1000~1700 nm波段, 辐射光谱提供了更多燃烧信息, 但仍存在较强的连续辐射。参考相关文献^[13], 1090.3 nm是 $\text{CN}^*(A^2\Pi - x^2\Sigma^+)$ 的发射峰; 1135.4和1378.6 nm处是 H_2O (振动-转动)的吸收峰; 1460.6, 1488.7, 1505.7, 1536.6, 1581.7 nm处是 OH^* (振动-转动)发射峰; 在1172.4 nm和1407.5 nm是 $\text{C}_2^*(A^3\Sigma_g^- - x^3\Pi_u)$ 的发射峰。 H_2O 是燃烧反应中常见的物质, 也可能是环境中存在的水分子, 火焰区外层基态的 H_2O 吸收了其激发波长范围内的辐射, “双

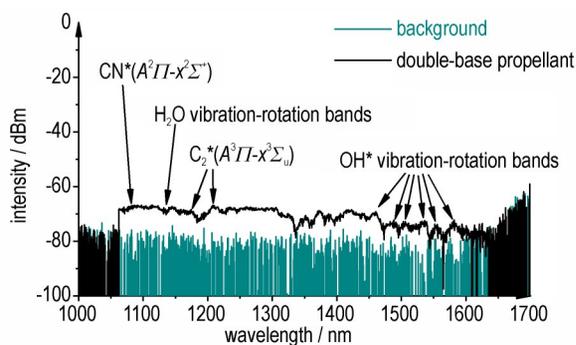


图5 双基药稳定燃烧近红外波段辐射光谱曲线

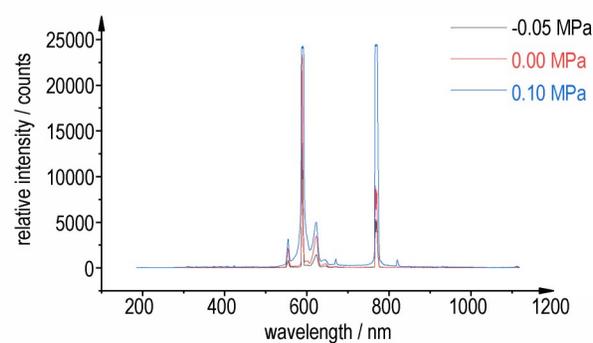
Fig.5 Radiation spectrum curve collected for the double-base propellant under the stable combustion in the near-infrared band

芳-3”双基药燃烧产生 H_2O 的机制与“20/7”单基药类似。但对于“双芳-3”双基药, 这些基团的发射峰和吸收峰相对于连续辐射较弱, 分辨率很低, 在大部分时间内难以观测。连续光谱的掩盖导致200~1100 nm波段可提供的燃烧化学信息较少, 而红外波段可能会提供更多的化学信息。“双芳-3”双基药燃烧反应开始后, 随着反应的进行, 温度升高, 红外辐射增强会掩盖这一波段的特征, 不同阶段记录的辐射光谱不同。

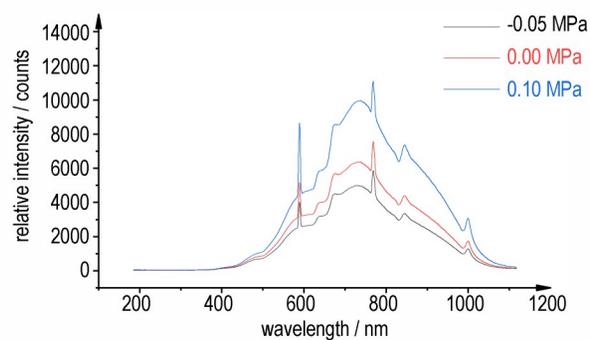
“双芳-3”双基药的燃烧辐射光谱具有明显的连续光谱, 连续光谱的峰值波长比Na和K的发射峰更有特异性, 所以针对此类发射药的探测器设计应主要参考连续光谱的峰值波长。

2.3 压力对单基药和双基药燃烧辐射的影响

为研究燃烧环境压力对发射药燃烧辐射的影响, 对“20/7”单基药和“双芳-3”双基药进行了不同压力下的燃烧火焰光谱测试, 结果如图6所示。由图6可以看出, 随着压力的升高, 燃烧火焰的辐射光谱强度增强。这是由于, 一是压力的增加促进了火焰区碳黑的生成; 二是压力升高, 环境中的氧气含量增多, 反应物



a. single-base propellant



b. double-base propellant

图6 不同压力条件下单基药和双基药稳定燃烧辐射光谱

Fig.6 Stable combustion radiation spectra collected for single-base propellant and double-base propellant under different pressure conditions

浓度提高,反应强度提高,辐射区域的温度更高;三是表面反应区内反应更剧烈,生成更多的气体,在进入反应区时带入了更多的固体颗粒。

提高压力会加快NC和硝化甘油(NG)的分解速率^[11],同时增加燃烧表面附近氧化性气体的浓度,导致燃烧强度增加。从热力学的角度来说,较高的压力也会使发射药表面和周围高温气体之间的传热系数增加^[17],有力地提高了燃烧速率和强度。

低压条件下“20/7”单基药和“双芳-3”双基药均未能完全燃烧,在底部有少量残余。根据加热层理论^[11],低压条件下,当凝聚相反应热效应强度、火焰区高温反应物对燃面的传热强度以及环境与燃面的热交换强度之和小于发射药维持稳定燃烧必须的临界热效应强度时,由于无法建立稳定的加热层,2种发射药的燃烧强度会逐渐减弱,直至熄灭,导致部分样品留有残余,燃烧反应未进行到底。发射药生产储存过程中,较低的环境压力和较薄的堆积厚度导致火药的燃烧能力下降,对抑爆系统而言所需要的抑爆剂含量和探测器灵敏度要求较低。在一定范围内环境压力的升高提升了发射药的燃烧强度,使用环境压力越高,探测器的灵敏度要求越高。

在研究低压条件下“双芳-3”双基药燃烧辐射随时间变化的特性时,将火焰辐射强度超过背景辐射强度10%定义为燃烧开始,记录了“双芳-3”双基药燃烧初始0.2 s的燃烧辐射时序光谱,结果如图7所示。在-0.05 MPa压力条件下,“双芳-3”双基药燃烧初期的火焰光谱出现了和“20/7”单基药类似的特征,仅有较弱的连续光谱,且Ca的发射峰可以被观察到。但这一特征仅在燃烧初始阶段维持了较短的时间,随后连续光谱强度开始增强,这一特征也被连续光谱掩盖。这可能是因为在低压下燃烧反应的初始阶段,燃烧室内

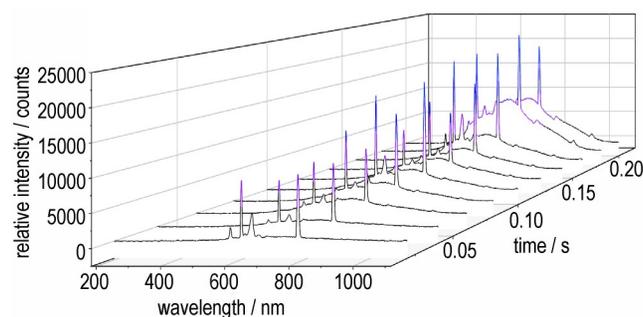


图7 -0.05 MPa下双基药燃烧初始0.2 s内的时序辐射光谱
Fig.7 Radiation spectra in time series obtained for the double-base propellant combusting in the initial 0.2 s at pressures of -0.05 MPa

氧气含量高,固体颗粒的生成量少,且温度低,连续光谱弱。但是随着反应的进行,反应变得剧烈,燃烧区氧气含量变少,火焰区温度高,固体颗粒增多导致连续辐射变强。因此,针对低压使用情况下的双基药抑爆系统探测器设计时,主要识别对象应为燃烧初期辐射强度较强的金属发射峰,否则会导致探测器的响应速度变慢。

3 结论

(1)“20/7”单基药常压燃烧火焰光谱中有OH*, C₂*, CHO*等基团强度较弱的发射峰,1000~1700 nm波段辐射强度过低均不宜作为探测波段。原料纤维素中含有Na, K, Ca等金属组分,导致明显的Na, K, Ca特征峰,感光探测器应主要依据Na和K的辐射光谱设计。

(2)“双芳-3”双基药常压燃烧火焰光谱中有大量固体颗粒导致的强烈连续辐射,且Na和K金属的发射峰十分明显,在1000~1700 nm波段有H₂O的吸收峰和OH*, C₂*的发射峰但强度较弱,其探测器的设计主要依据连续光谱的峰值波长,结合Na和K的辐射光谱提高探测可靠性。

(3)环境压力提高,“20/7”单基药和“双芳-3”双基药辐射光谱强度均增大,感光探测器触发阈值应随环境压力调整。低压下“双芳-3”双基药燃烧初期辐射光谱相近于“20/7”单基药,此时应以Na和K的发射峰为主要探测对象。

参考文献:

- [1] CHOI J, LEE S, KIM J, et al. Research of Solid Propellant Electrostatic Sensitivity in Confinement [J]. *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 2020, 24(4): 73-78.
- [2] DE KLERK W P C. Assessment of stability of propellants and safe lifetimes [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, 40(3): 388-393.
- [3] 胡世扬, 白汝岩, 霍雅玲, 等. 双基药[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
HU Shi-yang, BAI Ru-yan, HUO Ya-ling, et al. Double-base propellant [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984.
- [4] 蒋星润. 火焰光谱分析系统[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.
JIANG Xing-run. Flame spectrum analysis system [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014.
- [5] YANG Rong-jie, LI Yu-ping, ZHANG Jie, et al. Diagnostics of flame temperature distribution of solid propellants by spectrographic analysis [J]. *Combustion & Flame*, 2006, 145(4): 836-844.
- [6] SHEEHE S L, JACKSON S I. Identification of species from visible and near-infrared spectral emission of a nitromethane-air

- diffusion flame[J]. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 2019, 364: 111185.
- [7] 程和平. 含能材料黑索金热爆炸过程中的光辐射能测量和光谱学研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2014.
- CHENG He-ping. Energy Measurements and Spectroscopic Studies on Optical Radiation from RDX Thermally Explosive Process [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2014.
- [8] YUAN Ji-fei, LIU Jian-zhong, ZHOU Yu-nan, et al. Thermal decomposition and combustion characteristics of Al/AP/HTPB propellant [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 143(6): 3935–3944.
- [9] 周禹男. 铝及铝基固体推进剂能量释放特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- ZHOU Yu-nan. Study on energy release characteristics of aluminum particles and aluminum-based solid propellants [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [10] 苑继飞, 刘建忠, 王健儒, 等. 压力对纳米铝粉/RDX混合物聚光点火燃烧特性的影响[J]. 含能材料, 2018, 26(4): 297–303.
- YUAN Ji-fei, LIU Jian-zhong, WANG Jian-ru, et al. Effect of pressure on condensing ignition and combustion characteristics of nano-aluminum/RDX mixture [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(4): 297–303.
- [11] KENNETH K K, SUMMERFIELD M. Solid propellant combustion foundation [M]. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1984.
- [12] 王泽山, 欧育湘, 任务正. 火炸药科学技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.
- WANG Ze-shan, OU Yu-xiang, REN Wu-zheng. The science and technology of explosives [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005.
- [13] GAYDON A G. The Spectroscopy of Flames [M]. New York: John Wiley, 1974.
- [14] 李彦. 原子发射光谱双谱线法测量火工药剂燃烧温度[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- LI Yan. Flame Temperature Measurement of Pyrotechnics Using Atomic Emission Two-line Method [D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [15] GARCIA-ARMINGOL T, BALLESTER J. Influence of fuel composition on chemiluminescence emission in premixed flames of CH₄/CO₂/H₂/CO blends [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(35): 20255–20265.
- [16] GUIBERTI T F, DUROX D, SCHULLER T. Flame chemiluminescence from CO₂- and N₂-diluted laminar CH₄/air premixed flames [J]. *Combustion and Flame*, 2017, 181: 110–122.
- [17] YAGODNIKOV D A, ANDREEV E A, VOROB'EV V S, et al. Ignition, combustion, and agglomeration of encapsulated aluminum particles in a composite solid propellant. I. Theoretical study of the ignition and combustion of aluminum with fluorine-containing coatings [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2006, 42(5): 534–542.

Combustion Radiation Characteristics of Typical Single-Base Propellant and Double-Base Propellant

HOU Peng-fei¹, PAN Ren-ming¹, ZHU Ri-hong², LI Fang-xin², GE Rui-rong³

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. School of Electronic Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 3. Anhui Red Star Electromechanical Technology Co., Ltd., Hefei 230093, China)

Abstract: The flame radiation characteristics of the single-base propellant and double-base propellant during combustion were explored for the guidance in the design of detectors for explosion suppression systems, by which the propellant flame spectroscopy experimental system was designed and constructed. The flame radiation spectra of typical single-base propellant and double-base propellant burning in air under different pressure conditions (–0.05, 0.00, 0.20 MPa) were collected and analyzed. Under atmospheric air, single-base propellant displays a weak continuous radiation only in the range of 550–650 nm. Due to the less interference of the continuous spectrum, the emission peaks of OH*, C₂*, CHO* and other emitting species can be identified in the combustion flame spectrum for the single-base propellant, and these active intermediates may be present in the flame zone during combustion. In contrast, the combustion flame radiation spectrum of double-base propellant shows the strong continuous radiation in the range of 200–1700 nm, which is attributed to that there are a large number of solid particles in its flame zone, that masks part of the emission peak information in the 200–1700 nm band. In the 1000–1700 nm band, the emission peaks of CN*, OH* and other groups were collected during the combustion of the double-base propellant. In addition, there are strong Na, K and Ca emission peaks in the flame spectra of the double-base propellant and single-base propellant, and Na, K and Ca species may come from the residual lignin in nitrocellulose. As the ambient pressure in the combustion chamber increases, the intensity of combustion radiation of both propellants is enhanced. The continuous radiation of double-base propellant in the initial stage of combustion is weak under low pressure conditions, and the characteristic peaks are similar to that of single-base propellant are collected. According to the test results, the detector for the single-base propellant should be designed based on the emission peaks of Na and K, while the detector for the double-base propellant should be designed in accordance to the peak wavelength of the continuous spectrum. The higher the ambient pressure, the lower the detector trigger threshold.

Key words: propellant; burning; flame radiation; spectral characteristics; pressure

CLC number: TJ55; X93

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2022247

(责编: 王馨逸)