

低温下三组元固体推进剂燃烧波阵面 变化规律实验研究^{*}

伍俊英, 刘嘉锡, 张晓舟, 杨利军, 李姚江, 吴姣姣, 陈 朗

(北京理工大学 机电学院 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 深入了解高能固体推进剂在低温条件下燃烧性能, 获得燃烧波阵面变化规律, 对评估推进剂在低温条件下的适应性能力具有重要指导意义。本文设计了燃烧波狭缝观测实验装置, 采用高速摄影观测技术, 对三组元HTPB固体推进剂在常温和低温条件下的燃烧过程进行了观测, 获得了燃烧过程中波阵面的图像。结果表明, 相比于在常温条件下, 固体推进剂在低温条件下出现了燃烧波不稳定的情况。根据燃烧波图像计算出了推进剂的燃速, 并与靶线法燃速测量结果进行比较。结果表明, 两种方法测量的结果差异较小, 推进剂在低温条件下的燃烧速度明显低于在常温条件下, 常温条件的燃速在1.717~2.127mm/s, 低温条件下的燃速在1.252~1.583mm/s。

关键词: 固体推进剂; 低温; 燃烧波; 燃烧速度; 高速摄影法

中图分类号: V512 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 06-200718-06

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200718

Experiment on Change Law of Combustion Wavefront of Three-Component Solid Propellant under Low-Temperature Conditions

WU Jun-ying, LIU Jia-xi, ZHANG Xiao-zhou, YANG Li-jun, LI Yao-jiang, WU Jiao-jiao, CHEN Lang

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, School of Mechatronical Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: An in-depth understanding of the combustion performance of the propellants in low-temperature conditions and collecting the change law of combustion wavefront can provide a significant guidance for evaluating the adaptability of the propellants in low-temperature conditions. A slit observation device that can improve the observation quality of combustion waves was designed. The rapid photograph method was carried out to collect the combustion process of the three-component HTPB solid propellant in normal-temperature and low-temperature conditions and the images of the combustion waves were obtained. The results show that, compared with the normal-temperature conditions, the combustion wavefront of the propellants is unstable in low-temperature conditions. The combustion velocity of propellant was calculated based on the images taken by the rapid photograph method, which was compared with the results of the target line method. The results show that the difference between the results from the two methods was small, and the combustion velocity in the low-temperature conditions is significantly lower than that in normal-temperature conditions. The combustion velocity of the propellant

^{*} 收稿日期: 2020-09-15; 修订日期: 2021-03-23。

基金项目: 装备预研领域基金 (61407200203)。

通讯作者: 伍俊英, 博士, 副教授, 研究领域为含能材料燃烧与爆炸。

引用格式: 伍俊英, 刘嘉锡, 张晓舟, 等. 低温下三组元固体推进剂燃烧波阵面变化规律实验研究[J]. 推进技术, 2022, 43(6): 200718. (WU Jun-ying, LIU Jia-xi, ZHANG Xiao-zhou, et al. Experiment on Change Law of Combustion Wavefront of Three-Component Solid Propellant under Low-Temperature Conditions[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(6):200718.)

is between 1.717~2.127mm/s in normal-temperature conditions, and is between 1.252~1.583mm/s in the low-temperature conditions.

Key words: Solid propellant; Low temperature; Combustion waves; Combustion velocity; Rapid photograph method

1 引言

推进剂是能够通过燃烧释放能量并产生大量气体的含能材料,主要用于为火箭或导弹的发动机提供动力。随着空间探测活动的不断深入,发动机执行任务的环境越来越复杂。在某些情况下,发动机需要在低温环境下工作,这不仅要求固体推进剂能满足在低温环境下贮存、运输等过程中的安全性要求,同时还要求固体推进剂在低温条件下具有良好的燃烧特性。

固体推进剂燃烧波的结构可以反映固体推进剂的燃烧过程和燃烧特性。目前,人们主要采用高速摄影观测技术^[1-6]来观测燃烧波的结构。相恒升等^[7]采用高速摄影观测技术对推进剂在不同环境氧含量和压力条件下的燃烧过程进行了观测。结果表明,氧含量与环境压力增加时,推进剂的燃速增大。赖华锦等^[8]同样采用高速摄影观测技术,对推进剂在不同负压条件下的燃烧特性进行了研究。结果表明,随着压强的降低,推进剂燃速降低。固体推进剂的初始温度会影响推进剂的燃烧速度,聂万胜等^[9]研究了初始温度对推进剂燃烧稳定性的影响,开发了初始温度对推进剂燃烧速率影响的物理模型。David^[10]研究了初始温度对固体推进剂火箭发动机性能的影响,对推进剂进行稳态或非稳态燃烧行为进行了预测。由上述内容可知,人们对推进剂在不同条件下燃烧过程的燃烧波进行了观测,并对初温对推进剂燃烧的影响进行了一定研究,但目前还未见到有关固体推进剂在低温条件下的燃烧特性的研究。在低温条件下,固体推进剂可能会出现力学性能变差等问题。固体推进剂在燃烧的过程中,会承受巨大的应力。如果推进剂药柱强度不够,可能会出现裂纹、破碎、变形等问题,造成结构破坏,引起燃烧不稳定、燃烧转爆轰等严重事故。作为推进系统中的动力来源,深入研究固体推进剂在低温条件下的燃烧性能和燃烧波结构,对评估推进剂在低温条件下的性能具有重要指导意义,也对提升推进剂的综合性能提供了理论指导和依据。

本文以三组元HTPB复合固体推进剂为研究对象,在常温和低温条件下,进行推进剂燃烧实验,采

用高速摄影观测技术对固体推进剂的燃烧波进行观测,分析低温条件下的燃烧情况,获得燃烧波阵面变化规律。根据高速摄影结果,计算推进剂的燃烧速度。

2 高速摄影法观测推进剂燃烧波实验

2.1 实验样品

本文选用的推进剂为三组元HTPB复合推进剂,其配方为:AP,65.0%;Al,17.0%;HTPB,13.2%;DOA,4.0%;TDI,0.8%。其中,固体(AP和Al)含量为82%,液体(HTPB,DOA和TDI)含量为18%。该固体推进剂采用浇注工艺,制备成长条形。药条的横截面均为7mm×7mm,长度有两种,分别为100mm和150mm。其中,长度为150mm的药条如图1所示。

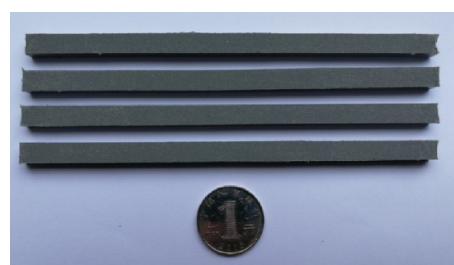
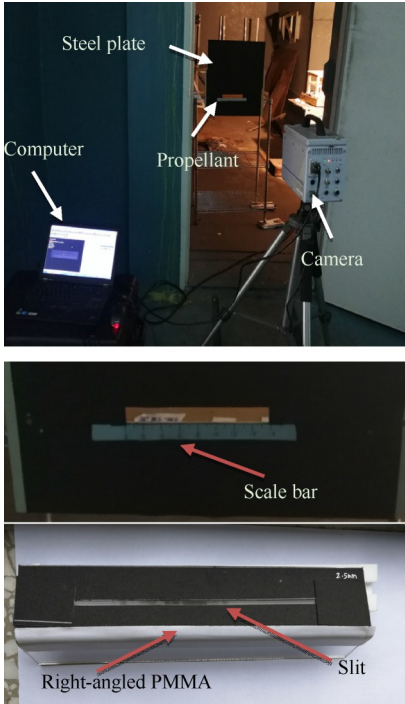
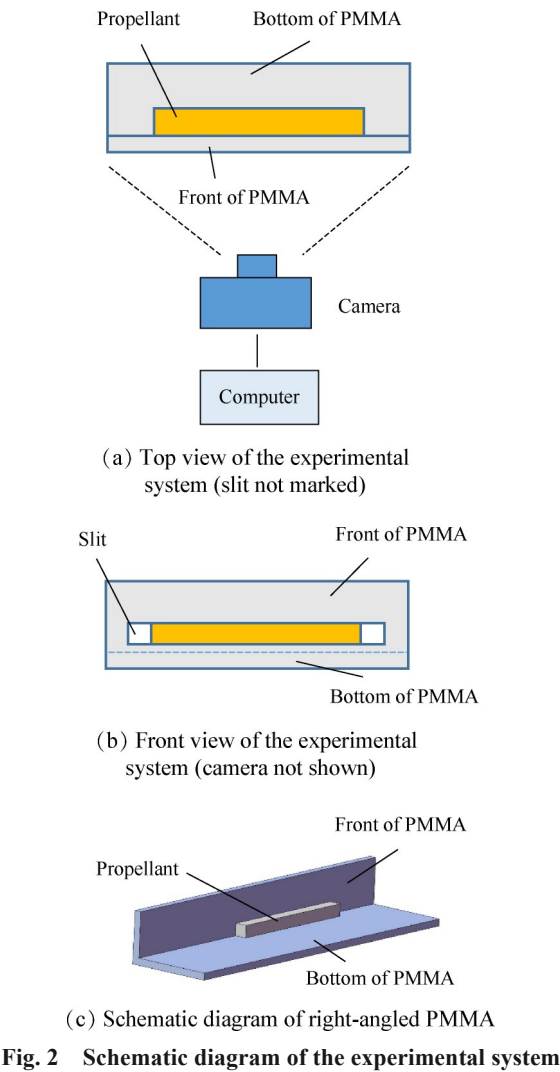


Fig. 1 Propellant strip with length of 150mm

2.2 实验测量装置

实验系统组成原理示意图如图2所示。实验装置包括:固体推进剂,带观测狭缝的直角有机玻璃(PMMA),高速相机和计算机。图3是实验装置实物图。实验时,将固体推进剂药条放置在直角有机玻璃的直角处,药条的两个相邻侧面紧靠有机玻璃板,如图2(c)所示。为了使观测更加准确,用黑色的色卡纸贴在透明直角有机玻璃板的外侧面,并在药条位置处留出一条狭缝,如图2(b)所示,狭缝的宽度为2mm。为了方便观测药条燃烧的长度,计算推进剂的燃烧速度,在窗口下面贴上刻度条,见图3。在观测推进剂燃烧的过程中,由于燃烧的火焰温度很高而且燃烧程度剧烈,因此在直角有机玻璃的上方固定一块薄钢板,用来减少火焰对观测效果的影响。高速相机的拍摄帧数设置为每秒125帧,输出结果由计算机记录。本文的实验均在常温条件的大气压环境下进行。

对固体推进剂在常温和低温条件下的燃烧过程

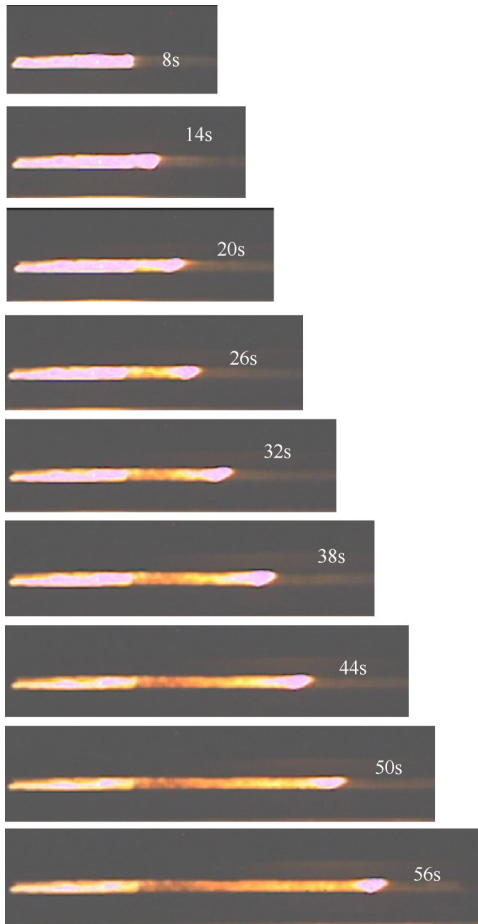


进行了高速摄影观测实验,共进行了 14 发,其中常温实验 4 发(编号 No.1~4),低温实验 10 发(编号为 No. 5~14)。其中,低温实验是将推进剂药条放置在冷冻柜中进行冷冻,冷冻温度约为 -60°C ,冷冻时间约 7~9h。低温固体推进剂从低温柜取出后,均在 1min 中进行实验,以保证在低温条件下实验的准确性。

3 实验结果与讨论

3.1 燃烧波阵面分析

以编号为 No.13 推进剂在低温条件下的燃烧情况为例进行分析,如图 4 所示。No.13 推进剂药条长 150mm,在 -55°C 条件下冷冻时长为 7.5h。由实验照片可以看出,该固体推进剂燃烧过程产生了明亮的火焰且伴随耀眼的白光。在固体推进剂从被点火到点火后 8s 的时间范围内,固体推进剂的燃烧波阵面一直垂直于水平线。随着燃烧的进行,在 14s 时,燃烧波阵面发生倾斜,这是由于在实验过程中,药条被放置在有机玻璃基板上,所以药条下表面的燃烧速度低于暴露在空气中的上表面的燃烧速度。在 20s 之后,可以观察到推进剂燃烧波阵面的倾斜角度几乎不再随



时间发生变化,这表明燃烧波阵面已达到稳定的状态,以斜面的形式层层推进地向前传递。在 4 发常温固体推进剂的燃烧实验(编号为 No.1~4)和前 9 发的低温燃烧实验(编号为 No.5~13)中,同样可以观察到推进剂燃烧波阵面在达到稳定后,以斜面的形式层层推进向前传递。由此可知,该固体推进剂在低温条件下的燃烧波结构较好,燃烧过程比较稳定。

图 5 为编号为 No.14 的低温推进剂燃烧状态。该

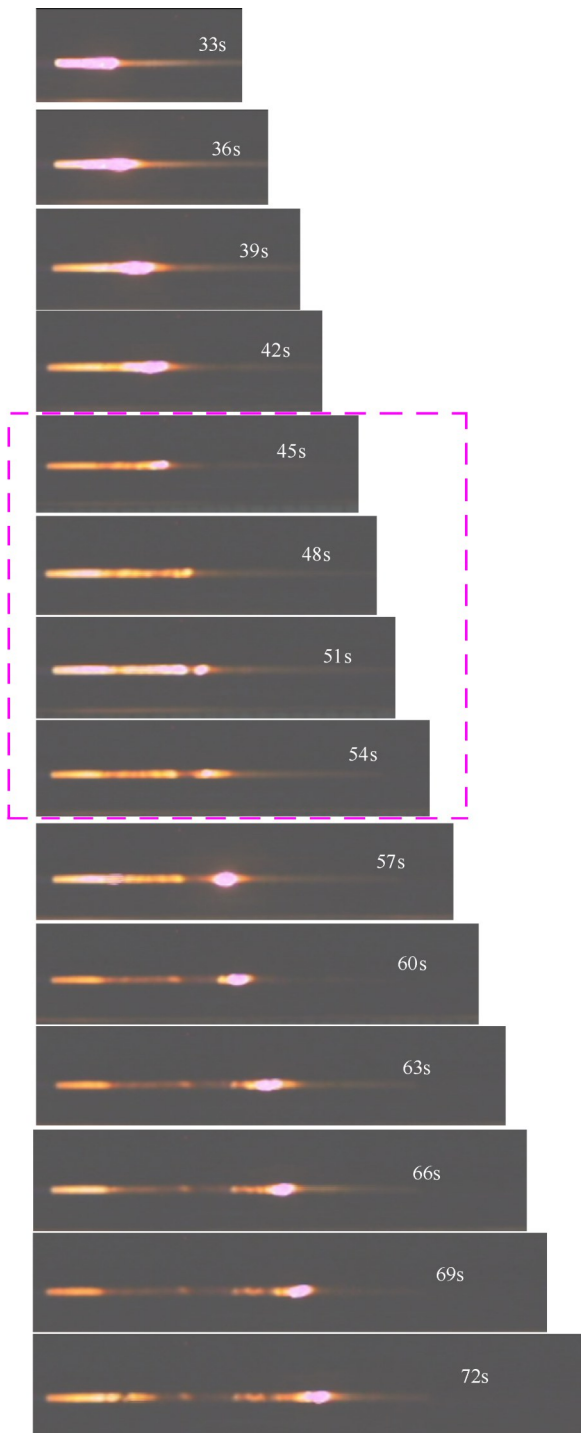


Fig. 5 Combustion of No.14 propellant at different times (low-temperature condition)

实验药条长 100mm,在-55℃条件下冷冻时长约为 8h。由实验照片可以看出,在 33s 前,推进剂在稳定地燃烧。随着燃烧的进行,在 45s 时,可以看到推进剂燃烧产生的亮光在减弱,且燃烧速度也减慢。在 48s 时,推进剂几乎停止燃烧。在 51s 时,推进剂重新燃烧。在 54s 时,推进剂燃烧发出的亮光又开始减弱。之后,推进剂又重新燃烧,直至燃烧完全结束。由此可知,该推进剂在燃烧过程中出现了燃烧波不稳定的情况,其原因可能是该药条经过冷冻后出现了药条质量下降的问题。在 14 发实验中(常温 4 发,低温 10 发),只有 No.14 的药条在低温条件下出现了燃烧波不稳定的现象,其它实验均没有出现此类现象。由此可知,相较于常温,推进剂在低温条件下出现了燃烧波不稳定的情况,这可能是因为药条在冷冻的过程中出现质量下降的问题。

3.2 燃烧波平均速度分析

对推进剂燃烧波速度进行分析。以编号为 No.12 推进剂燃烧情况为例。该推进剂药条长度为 150mm,在-58℃条件下冷冻时长为 7h。图 6 为该推进剂在不同时刻的燃烧波图片。图片选取推进剂燃烧波传播到 40,60,80,100,120,140mm 处的照片,对应时刻分别为 29,44,60,75,90,107s。燃烧波平均速度的计算公式如见式(1),由式(1)计算可知,该固体推进剂燃烧波的平均速度约为 1.285mm/s。

$$\bar{u} = \frac{\Delta l}{\Delta t} \tag{1}$$

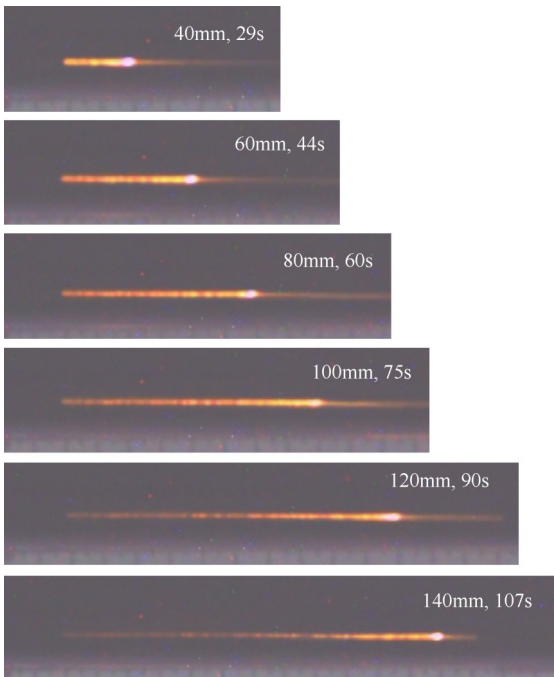


Fig. 6 Position of No.3 propellant combustion wave at different times (low-temperature condition)

式中 Δl 为燃烧波的传播距离, Δt 为间隔时间。

采用靶线法^[11-15]对本文中的固体推进剂在常温和低温条件下的燃速进行测量,并将计算结果和高速摄影法获得的燃速结果进行比较。图7是靶线法和高速摄影法获得的燃速结果对比。由图中可以看出,在常温和低温条件下,两种方法测得的推进剂燃速差异较小,这表明本文中采用高速摄影的方法测量固体推进剂在常温和低温条件下的燃速比较可靠。从图中可以看出,在常温条件下,固体推进剂的平均燃速要高于在低温条件下的平均燃速。推进剂在常温条件下的平均燃速均在1.717~2.127mm/s,最大差值为0.41mm/s。推进剂在低温条件下的平均燃速在1.252~1.583mm/s,最大差值为0.331mm/s。

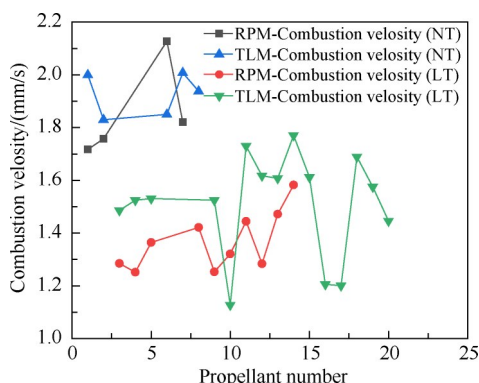


Fig. 7 Comparison of combustion velocity between rapid photography method (RPM) and target line method (TLM) in low-temperature (LT) and normal-temperature (NT) conditions

4 结 论

本文采用高速摄影法获得了三组元HTPB固体推进剂在常温和低温条件下燃烧过程中波阵面的变化情况,主要结论如下:

(1)推进剂在低温条件下的燃烧速度明显低于在常温条件下,常温条件下推进剂的燃速在1.717~2.127mm/s,低温条件(约-60℃)下的燃速在1.252~1.583mm/s。

(2)根据燃烧波阵面的瞬态图像计算出了固体推进剂在常温和低温条件下的燃烧速度,并与靶线法测量的燃速进行了对比。结果表明,两种方法测量的实验结果差异较小。

(3)相较于常温条件,推进剂在低温条件下的燃烧出现了燃烧波不稳定的情况,其原因可能是在冷

冻的过程中,推进剂出现质量下降的问题。

致 谢:感谢装备预研领域基金的资助。

参考文献

- [1] Suresh M, Mihir L. On the Dynamics and Instability of Bubbles Formed During Underwater Explosions[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1998, 16(3): 305-321.
- [2] 冯 淞, 饶国宁, 彭金华, 等. CL-20基炸药水中爆炸气泡脉动实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(4): 855-862.
- [3] Wei W F, Wu J, Li X W, et al. Characteristics of Laser Produced Plasmas Obtained by Fast ICCD Photography, Schlieren Photography and Optical Emission Spectroscopy[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(9): 2173-2179.
- [4] 李 维, 李建中, 张开晨, 等. 内燃波转子复杂波系及火焰传播特性实验研究[J]. *推进技术*, 2019, 40(2): 355-362. (LI Wei, LI Jian-zhong, ZHANG Kai-chen, et al. Experimental Investigations of Complex Wave and Flame Propagation Characteristics of Internal Combustion Wave Rotor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(2): 355-362.)
- [5] 高玉闪, 刘小勇, 金 平. 全流量补燃循环气气燃烧相似性缩尺试验研究[J]. *推进技术*, 2019, 40(7): 1554-1559. (GAO Yu-shan, LIU Xiao-yong, JIN Ping, et al. Reduced-Scale Test of Gas-Gas Combustion Similarity in Full-Flow Stage Combustion Engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(7): 1554-1559.)
- [6] 唐 乐, 许志伟, 陈苏杭, 等. 固液混合推进石蜡燃料的性质及燃烧性能研究[J]. *推进技术*, 2017, 38(9): 2138-2145. (TANG Le, XU Zhi-wei, CHEN Su-hang, et al. Study on Properties and Combustion Performance of Paraffin Fuels for Hybrid Rocket Propulsion[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(9): 2138-2145.)
- [7] 相恒升, 陈 雄, 周长省, 等. 环境氧含量和压力对铝镁贫氧推进剂燃烧性能的影响[J]. *含能材料*, 2017, 25(3): 191-197.
- [8] 赖华锦, 陈 雄, 周长省, 等. 负压环境下铝镁贫氧推进剂激光点火及燃烧特性[J]. *含能材料*, 2017, 25(10): 817-821.
- [9] 聂万胜, 庄逢辰. 推进剂初始温度影响液体火箭发动

- 机燃烧稳定性的数值模型[J]. 导弹与航天运载技术, 2000(4): 32-37.
- [10] David R G. Influence of Initial Propellant Temperature on Solid Rocket Internal Ballistics [C]. *United States: 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2013.
- [11] 张超, 张晓宏, 马亮, 等. 低燃速无烟黑索今改性双基推进剂燃烧性能[J]. 科学技术与工程, 2017(28): 291-296.
- [12] 袁志锋, 赵风起, 焦建设, 等. 2,4-二羟基苯甲酸铅铜盐对 Al/RDX-CMDB 推进剂燃烧性能的影响[J]. 火工品, 2014(4): 20-23.
- [13] 庞维强, 王可, 胥会祥, 等. 含碳氢燃料(ACH)的低特征信号富燃料推进剂特性[J]. 固体火箭技术, 2018, 41(6): 732-739.
- [14] 胡松起, 李葆萱, 王英红, 等. 含硼富燃料推进剂低压燃烧特性[J]. 推进技术, 2002, 23(6): 518-520. (HU Song-qi, LI Bao-xuan, WANG Ying-hong, et al. Combustion Characteristics of Boron-Based Fuel-Rich Propellant at Low Temperature[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 23(6): 518-520.)
- [15] 袁志锋, 王江宁, 张超, 等. 纳米材料对双基和改性双基推进剂燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 69-72.

(编辑:张贺)