

文章编号:1006-9941(2022)08-0811-08

NEPE推进剂在氮气及空气中的点火燃烧特性

涂乘崧¹,陈雄¹,周长省¹,张北辰¹,李连波²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 南京工业职业技术大学机械工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 为了研究NEPE推进剂的点火燃烧特性,搭建了CO₂激光点火试验平台,使用高速摄影仪拍摄在不同气体环境下NEPE推进剂的燃烧过程,通过信号采集系统测量NEPE推进剂的点火延迟时间,对NEPE推进剂在0.1~3.0 MPa氮气及空气中的点火燃烧特性进行了研究。结果表明,环境压强和环境气体会影响NEPE推进剂的点火燃烧过程,环境压强越大,NEPE推进剂燃烧越激烈,且NEPE推进剂在空气中燃烧时比氮气中更加剧烈。NEPE推进剂的点火延迟时间随着环境压强的增大而减小,当环境压强从0.1 MPa增大到3.0 MPa时,氮气中的点火延迟时间由0.51 s减小到0.29 s,而空气中的点火延迟时间由0.32 s减小到0.18 s,但是当环境压强大于0.5 MPa时,环境压强对点火延迟时间的影响显著降低。同时环境压强会影响NEPE推进剂的燃烧速率,当环境压强从0.1 MPa增加到3.0 MPa时,氮气中的燃速从1.71 mm·s⁻¹提高到4.54 mm·s⁻¹,空气中的燃速从2.51 mm·s⁻¹提高到11.4 mm·s⁻¹,NEPE推进剂在空气中的燃烧速率增长幅度更大。最后通过燃速经验公式进行拟合,表明Vielle燃速公式更适用于表征NEPE推进剂在0.1~3.0 MPa下的燃速特性。

关键词: NEPE固体推进剂;激光点火;氮气;空气;燃烧特性

中图分类号: TJ55;V435

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2021326

0 引言

固体推进剂作为固体火箭发动机的能源和工质源,决定了发动机的能量特性,因此研究固体推进剂的点火燃烧特性,揭示其点火和燃烧机理、应用和开发新型推进剂具有重要意义^[1-3]。硝酸酯增塑聚醚(NEPE)推进剂结合了复合推进剂和双基推进剂的优点,具有高能量以及良好的力学性能^[4]。NEPE推进剂的比冲可以达到2685 N·s·kg⁻¹,是当今世界上公开报道中已获得应用的能量最高的固体推进剂^[5]。

激光点火具有输出能量高,外部干扰小,点火时间和能量可控和对环境因素不敏感等优点,被广泛应用于固体推进剂的燃烧性能研究中^[6-10]。点火温度、点火延迟时间和点火能量是固体推进剂激光点火特性的

典型表征参数。Ulas和Kuo^[11]研究了6种固体推进剂在不同激光功率和燃烧室压力下的点火和燃烧性能的可燃性,然而关于双基或复合推进剂点火和燃烧机理的研究尚不能应用于NEPE等新型高能推进剂。Medvedev^[12-13]利用脉冲激光研究了激光点火能量阈值能量密度对样品密度的依赖关系。相恒升^[14]和Li^[15]研究了0.1~1.5 MPa环境氧含量和压力对铝镁贫氧推进剂燃烧性能的影响,但并未对高压环境中铝镁贫氧推进剂的点火燃烧特性进行研究。赖华锦^[16]、刘高亮^[17]分别对负压环境中铝镁贫氧推进剂和改性双基推进剂点火燃烧过程进行了研究。与传统复合推进剂和双基推进剂相比,NEPE推进剂中有大量的含能组分,压强指数偏高,燃速可调节范围窄,燃速与压强指数调节技术相互制约,然而现有复合推进剂和双基推进剂的燃烧模型无法直接模拟其燃烧过程,因此有必要研究NEPE推进剂的燃烧特性。

对NEPE推进剂激光点火的研究相对有限,目前NEPE推进剂点火延迟时间和燃烧速率是研究的重点^[18-22]。NEPE推进剂点火延迟时间受到激光热通

收稿日期:2021-11-30;修回日期:2022-01-04

网络出版日期:2022-01-18

作者简介:涂乘崧(1995-),男,博士生,主要从事固体推进剂燃烧特性研究。e-mail:318101010027@njjust.edu.cn

通信联系人:陈雄(1977-),男,教授,主要从事计算流体力学及新型推进技术研究。e-mail:chenxiongjust@njjust.edu.cn

引用本文:涂乘崧,陈雄,周长省,等. NEPE推进剂在氮气及空气中的点火燃烧特性[J]. 含能材料,2022,30(8):811-818.

TU Cheng-yin, CHEN Xiong, ZHOU Chang-sheng, et al. Ignition and Combustion Characteristics of NEPE Propellant in Nitrogen and Air[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(8):811-818.

量^[18-20]和环境气体氧含量^[21]的影响,王鸿美^[18]认为 NEPE 推进剂点火延迟时间随着激光热通量的增加而减少,但当激光通量高于 $6.7 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ 时影响减小;Zhu^[19]认为在激光热流密度较低时,点火延迟时间随着激光热流密度的降低而急剧增加;Yan^[20]认为当能量密度低于点火能量阈值时,即使在持续的能量加载下也无法实现点火过程,而激光热流密度的增加会导致点火延迟时间的减小,但对点火温度的影响不大。相恒升^[21]研究了环境气体中氧含量对 NEPE 推进剂点火延迟时间的影响,认为高氧含量的环境气体可减小 NEPE 推进剂的点火延迟时间,但减小程度与激光辐射功率密度有关。Yan^[22]测量了 4 种新型 NEPE 推进剂的燃速和燃面温度,并观察其燃烧火焰,分析不同推进剂成分对燃烧速率的影响,并对自由基裂解模型进行了改进,使其可以用于预测 NEPE 推进剂的燃烧速率。

基于此,本研究通过搭建小型封闭 CO_2 激光点火试验平台,对 NEPE 推进剂在 0.1~3.0 MPa 氮气及空气中的点火燃烧特性进行研究。采用高速摄影仪记录其点火燃烧过程,通过光电二极管测量其点火延迟时间,研究结果有助于揭示 NEPE 推进剂的点火机理以及影响点火过程的因素,为 NEPE 推进剂的研究和应用提供了依据。

1 实验部分

1.1 实验样品

实验中使用 NEPE 推进剂,其基本组成部分包括黏合剂(聚乙二醇, CAB, 7%)、增塑剂(1,2,4-丁三醇三硝酸酯, BTTN, 20%)、氧化剂(高氯酸铵, AP, 25%)、金属添加剂(铝粉, Al, 25%)、黑索今(环三亚甲基三硝铵, RDX, 20%)和催化剂(3%)。在实验中,使用 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的正方体样品。为了防止试件发生侧面燃烧,影响实验现象的观察,用硅橡胶将其侧面包覆。

1.2 实验系统

激光点火实验系统主要由控制系统、 CO_2 激光器、光学系统、燃烧室、数据采集系统和燃烧产物收集系统组成,如图 1 所示。控制系统由计算机软件和控制卡组成,用于调节 CO_2 激光器的激光加载时间和热流密度。 CO_2 激光器功率 300 W,波长为 $10.6 \mu\text{m}$,激光光斑直径 $\Phi 3.5 \text{ mm}$ 。光路系统由燃烧室顶部的平面镜和聚焦镜组成。光学系统的作用是将由激光器发射出的

水平激光束转变为垂直激光束,确保垂直激光束能准确地照射在推进剂试件表面,并能够调节激光光斑直径。燃烧室的尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,其前、后分别设 $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的观察窗,顶部设有直径 $\Phi 20 \text{ mm}$ 的激光入射窗。燃烧室内的压强通过压强传感器监测,数据采集系统是通过两个光电二极管获取激光信号和推进剂初始火焰信号。数据采集系统由图像记录设备、光电二极管、放大电路和数据采集卡组成,主要用来测量推进剂的点火延迟时间。采用两个光电二极管分别对激光出光信号和推进剂火焰信号进行采集。采集到的光信号由光电二极管转换成电压信号传递给数据采集卡,并最终显示在计算机上。另外,对采集激光出光信号的光电二极管信号进行放大,输出给发光二极管(LED),LED 安装在拍摄视角内。当激光开始出光后,光电二极管采集到信号并将其转换为电信号,被放大的电信号经输出给 LED,LED 发光并被高速摄像机捕捉到,就将这一刻作为激光点火过程零起点。对推进剂火焰信号进行采集的光电二极管的初始信号作为推进剂点火时刻。

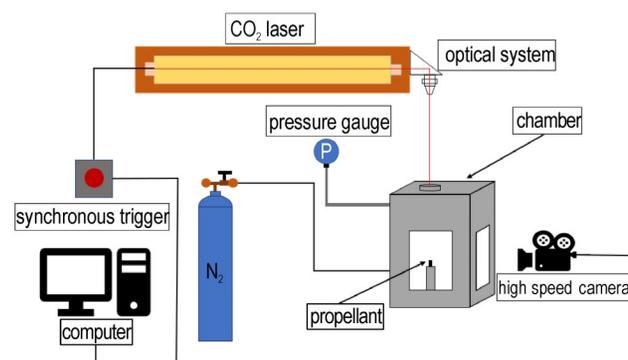


图 1 激光点火试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the laser ignition experimental system

1.3 实验过程

实验在常温 ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) 下进行,设定激光热流密度为 $2.5 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$,激光加载时间为 1 s,环境压强为 0.1、0.15、0.3、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 MPa,实验中所用的气体为氮气及空气,NEPE 推进剂被激光点燃后火焰传播至整个样品表面时记作推进剂燃烧的开始时刻,当推进剂火焰高度降至稳定燃烧火焰高度的一半时认为推进剂燃烧结束,从高速摄影仪拍摄到的推进剂燃烧过程中计算得到推进剂的燃速^[23-26]。在每种实验条件下进行 5 次重复性试验,以确保试验数据的可靠

性。通过减压阀控制高压气瓶导入燃烧室的气体流量,观察压强传感器示数,使燃烧室中的气体压强达到预设值。

2 结果与讨论

2.1 推进剂的点火过程

NEPE 推进剂的点火燃烧过程可以分为 4 个阶段:惰性加热期、热解、初始火焰和稳定燃烧。 CO_2 激光器发射激光辐射到推进剂试件表面后,推进剂表面开始吸收激光能量,温度逐渐升高,此阶段为惰性加热期。当推进剂温度达到发生热力学相变的熔点时,开始分解熔化,在推进剂试件表面形成由固体和液体组成的糊状区域。部分液相发生热解反应产生气体产物,同时气相产物快速从推进剂表面蒸发出来进入到周围的环境气体中,形成热解气体,如图 2a 所示。热解气体彼此会发生反应或分解形成其它气体物质,这些物质又会和环境中的氧气发生氧化反应,并在气相中释放大热量,最终温度达到绝热火焰温度,形成不附着在推进剂表面的初始火焰,如图 2b 所示。随后,发生燃烧产物的二次燃烧,产生的火焰向推进剂表面扩张并

膨胀,最后到达与其稳态条件相对应的静止位置,这时来自气相放热反应以及固相放热的热反馈能维持推进剂达到稳定燃烧,具有恒定的燃烧速率,如图 2c 所示。

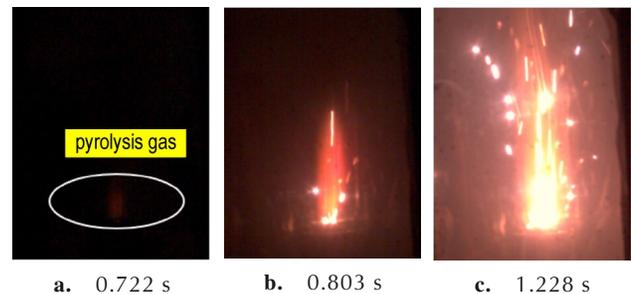


图 2 NEPE 推进剂的点火过程

Fig.2 The ignition process of a typical NEPE propellant

NEPE 推进剂是一种物理混合的非均质推进剂,其中氧化剂 AP 在温度达到 420 K 左右时开始分解,且在高温下的燃烧非常剧烈^[27],RDX 在 478 K 开始分解^[28],BTTN 的分解温度为 523~773 K,CAB 的分解温度为 458 K^[29]。NEPE 推进剂吸收热量后固体区域逐渐升温,分解成相应的气相产物,在点火过程中的分解反应如表 1 所示。

表 1 NEPE 推进剂主要组分在点火过程中的分解反应

Table 1 Decomposition reactions of the main components of NEPE propellant in ignition process

composition	molecular formula	decomposition reaction	reference
AP	NH_4ClO_4	$2\text{NH}_4\text{ClO}_4 \rightarrow \text{N}_2 + 4\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 + 2\text{O}_2$	[30]
RDX	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6\text{N}_6$	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6\text{N}_6 \rightarrow 3\text{HCN} + 1.5\text{NO} + 1.5\text{NO}_2 + 1.5\text{H}_2\text{O}$	[30-31]
CAB	$\text{C}_{15}\text{H}_{22}\text{O}_8$	$\text{C}_{15}\text{H}_{22}\text{O}_8 \rightarrow 6\text{CH}_2\text{O} + 3\text{C}_2\text{H}_2 + \text{CH}_4 + 2\text{CO}$	[30]
BTTN	$\text{C}_4\text{H}_7\text{O}_9\text{N}_3$	$\text{C}_4\text{H}_7\text{O}_9\text{N}_3 \rightarrow 2.2\text{NO} + 2.2\text{CO} + 1.5\text{H}_2 + 0.8\text{CO}_2 + 0.6\text{H}_2\text{O} + 0.6\text{O}_2 + 0.4\text{CH}_4 + 0.4\text{CH}_2\text{O} + 0.4\text{NO}_2 + 0.2\text{N}_2 + 0.1\text{C}_2\text{H}_4$	[30]

2.2 NEPE 推进剂在氮气/空气中燃烧过程

当热流密度为 $2.5 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ 时,由高速摄影仪拍摄得到 NEPE 推进剂在 0.1、0.5、1.0 MPa 氮气/空气中激光点火及燃烧过程如图 3 和图 4 所示。

通过在不同气体环境下拍摄到的 NEPE 推进剂的点火燃烧过程,可以看出 NEPE 推进剂在氮气和空气中的燃烧过程有很大的差异。如图 3a 所示,NEPE 推进剂在 0.1 MPa 的氮气中点燃时,整个燃烧过程中推进剂表面都不能形成明显的火焰,只能观察到连续的小火花。在图 3b 和图 3c 中,随着环境压强的增大,推进剂表面产生散状的火焰,且燃烧更加剧烈。造成这种现象的原因可能是因为在温度不变的条件下,环境压强的改变将引起气体物质浓度成比例的变化,环境

压强增大使燃烧室内单位气体体积缩小,单位体积内的氧气分子数增多,导致推进剂表面处的氧气浓度增大,因此 NEPE 推进剂在高压环境中燃烧更加剧烈,产生的火焰更大。

如图 4 所示,NEPE 推进剂在空气中燃烧时反应剧烈,在图 4a 中,NEPE 推进剂发出黄色的光芒,火焰呈竖条状,在图 4b 和图 4c 中,随着环境压强的增大,NEPE 推进剂燃烧更加剧烈,发生耀眼的白光,火焰呈扁圆形,由于空气中氧含量较高,NEPE 推进剂在空气中点燃时初始火焰迅速扩散到整个燃烧表面,而氮气环境中仅含有推进剂受热分解产生的少量氧气,因此在氮气中点燃时只能产生小火花,而 NEPE 推进剂在空气中燃烧时明显更加剧烈,火焰更加明亮、粗壮。

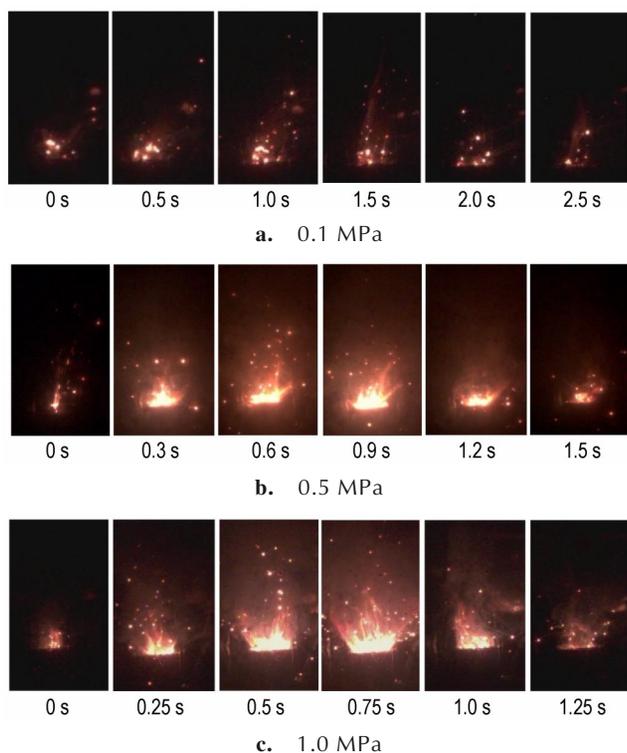


图3 不同环境压强下 NEPE 推进剂在氮气中的燃烧过程
Fig.3 Combustion process of NEPE propellant in nitrogen at different ambient pressures

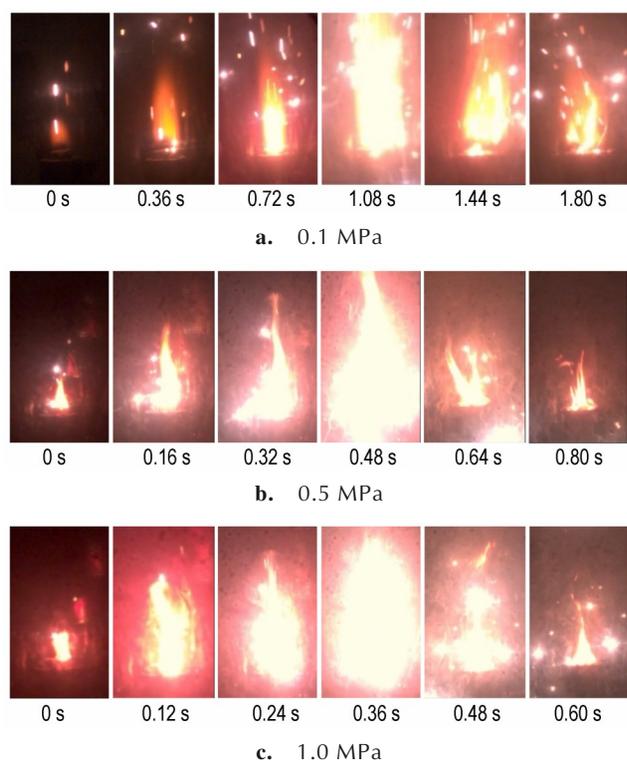


图4 不同环境压强下 NEPE 推进剂在空气中的燃烧过程
Fig.4 Combustion process of NEPE propellant in air at different ambient pressures

2.3 NEPE 推进剂的点火延迟时间

NEPE 推进剂的点火时间 t_{ig} 由 3 部分组成, $t_{ig} = t_{py} + t_{mix} + t_{chem}$, t_{py} 是推进剂的热解时间, 是指热解产物的量达到引燃所需最低值的热传导加热时间; t_{mix} 是推进剂热解气体的混合时间, 是指热解生成的燃料蒸气穿过流体边界层向外扩散, 并与周围的环境气体混合形成可燃混合物, 可燃混合物和氧气浓度达到点火要求所需的时间; t_{chem} 是推进剂的气相化学反应时间, 是指可燃混合物在点火源处发生燃烧所需的时间^[4]。通过燃烧室的压强传感器可以观察到在推进剂的点火过程中, 传感器的示数几乎没有变化, 因此可以忽略在推进剂点火过程中环境压强增加对点火过程的影响。

在同一激光热流密度下, NEPE 推进剂点火延迟时间 t_{ig} 随压强变化的经验公式^[32]可以表示为:

$$t_{ig} = a/p^2 + b \quad (1)$$

式中, t_{ig} 为推进剂的点火延迟时间, s; p 为燃烧室压强, MPa; a, b 为拟合参数。

采用最小二乘法对每个工况下 5 次测量结果的平均值进行拟合, 拟合曲线如图 5 所示, 拟合结果如表 2

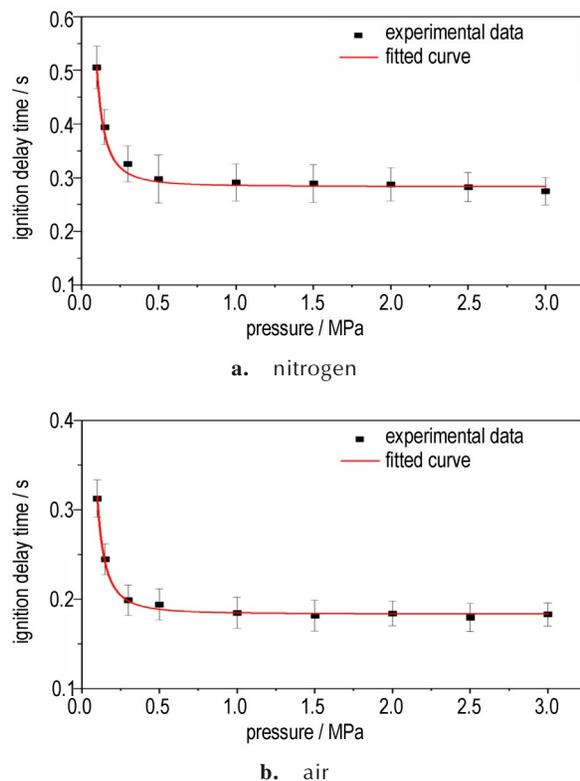


图5 NEPE 推进剂的点火延迟时间与环境压强的关系
Fig.5 Correlation between ignition delay time of NEPE propellant and ambient pressure

表2 不同环境压强下点火延迟时间的拟合结果

Table 2 Fitting results of ignition delay time at different ambient pressures

laser heat flux /W·mm ⁻²	ambient gas	fitting parameters	correlation coefficient (R^2)
2.5	nitrogen	$a_1=0.0022, b_1=0.2833$	0.978
2.5	air	$a_1=0.0013, b_1=0.1834$	0.984

所示。从图5可以看出,在相同热流密度的条件下,NEPE推进剂在氮气、空气中的点火延迟时间随环境压强的增加而减小。并且,推进剂在空气中的点火延迟时间明显比氮气中小,可以看出环境气体的氧含量对推进剂的点火延迟时间有很大的影响。NEPE推进剂在氮气中的点火延迟时间从0.51 s减小到0.29 s;在空气中的点火延迟时间从0.32 s减小到0.18 s。环境压强的增大会减小热解产物向周围环境扩散的速率,并且会增大分子间的碰撞频率以及化学反应速率,从而使化学反应区域靠近推进剂表面。同时放热反应区向靠近推进剂表面移动时,推进剂表面所得到的热反馈会增多,从而导致较短的点火延迟时间。同时,根据图5a和图5b可以看出当环境压强超过0.5 MPa时,NEPE推进剂的点火延迟时间与压强基本无关。

从表2可以看出,在不同的环境气体中,NEPE推进剂的点火延迟时间对环境气体的拟合参数是不同的。在氮气中点燃时,NEPE推进剂需要分解更多的氧气,环境氧含量才能达到引燃所需的最小值,导致热解时间更长,因此拟合参数 $b_1 > b_2$ 。而随着氧气含量的降低,在高压环境中可燃混合物和氧气浓度才能达到点火所需浓度,对环境压强的依赖性增强,因此拟合参数 $a_1 > a_2$ 。

2.4 压强对燃烧速率的影响

燃烧速率是指凝聚相燃料的质量损失速率,可以近似地用单位时间燃面退移的距离来表示,为了验证环境压强对NEPE推进剂燃烧速率的影响,在0.1、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 MPa环境压强下,对NEPE推进剂的燃烧速率进行测量。高速摄像法是通过记录固体推进剂的燃烧过程从而测得推进剂燃烧的一种动态测量方法^[33]。当热流密度为2.5 W·mm⁻²时,通过回放高速摄影仪拍摄的推进剂燃烧过程的序列图像,计算得到NEPE推进剂在氮气、空气各环境压强下的燃烧如表3所示。

从表3可以看出,NEPE推进剂在0.1~3.0 MPa氮气/空气中点燃时燃速随着环境压强的增加显著提高。

表3 NEPE推进剂在氮气/空气中的燃烧速率

Table 3 Combustion rate of NEPE propellant in nitrogen/air mm·s⁻¹

ambient gas	ambient pressure/ MPa						
	0.1	1.0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
nitrogen	1.71	3.19	3.19	3.27	3.86	4.03	4.54
air	2.51	5.42	7.40	9.10	10.1	10.8	11.4

当环境压强从0.1 MPa增加到3.0 MPa时,氮气中的燃速从1.71 mm·s⁻¹提高到4.54 mm·s⁻¹,增长幅度为165%,空气中的燃速从2.51 mm·s⁻¹提高到11.4 mm·s⁻¹,增长幅度为356%,随着环境压强的增加,燃速增加的幅度逐渐降低,且NEPE推进剂在空气中的燃速增长幅度更大。推进剂的燃烧伴随着燃烧表面的分解,分解气体在气相中扩散、混合和燃烧,为推进剂的点火和燃烧提供了复杂的环境气体、温度和压强条件。推进剂加热后首先分解成液相,液相区受环境压强的影响较大,传热系数随环境压强的增加而增大,因此NEPE推进剂在高压环境中分解速率较快,燃烧表面附近的氧气浓度升高,从而提高了整体燃烧强度。另一方面,较高的环境压强也导致推进剂表面与周围高温气体之间的传热系数增加,也有助于提高推进剂的燃烧速率。

通常使用Vielle燃烧速率公式^[34]和Summerfield燃烧速率公式^[34]分析固体推进剂的燃烧速率模型,如下:

Vielle燃速公式:

$$\dot{r} = a_v \cdot p^n \quad (2)$$

Summerfield燃速公式:

$$\frac{1}{\dot{r}} = \frac{a_s}{p} + \frac{b_s}{p^{1/3}} \quad (3)$$

式中, \dot{r} 为推进剂燃速,mm·s⁻¹; p 为压强,MPa; a_v 为Vielle公式的燃速系数; n 为燃速压强指数; a_s 和 b_s 为Summerfield公式的燃速系数, a_s 表征除压强以外的各种因素对化学反应速率的影响, b_s 表征除压强以外的各种因素对扩散效应的影响。

对NEPE推进剂在0.1~3.0 MPa下的燃速数据分别用Vielle公式和Summerfield公式进行回归分析,并得到回归曲线如图6所示。

图6a中Vielle公式^[34]的回归参数 $a_v=3.282$, $n=0.265$,相关系数 $R^2=0.981$; Summerfield公式^[34]的回归参数 $a_s=-0.016$, $b_s=0.330$,相关系数 $R^2=0.969$ 。图6b中Vielle公式的回归参数 $a_v=25.852$, $n=0.254$,

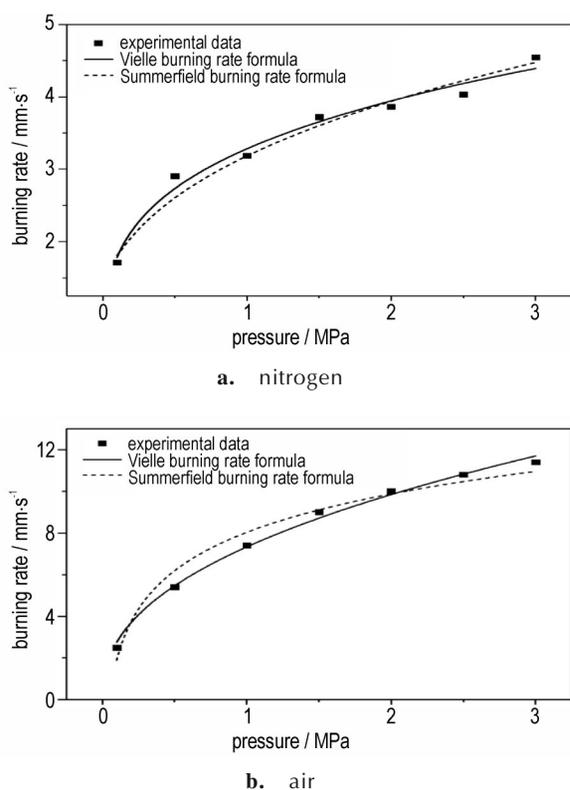


图6 NEPE推进剂的燃速拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves obtained for the burning rate of NEPE propellant

相关系数 $R^2=0.992$; Summerfield 公式的回归参数 $a_s=-0.002$, $b_s=0.043$, 相关系数 $R^2=0.948$ 。根据回归系数可以看出 Vielle 燃速公式在 0.1~3.0 MPa 与实验数据更加吻合, Summerfield 公式中的回归参数 a_s 较小, 所以 Summerfield 公式中的第一项可以忽略不计, NEPE 推进剂的燃速更接近于指数定律, 因此指数燃速定律 Vielle 燃速公式更加适用于预测 0.1~3.0 MPa 下 NEPE 推进剂的燃速。

3 结论

(1) NEPE 推进剂在不同环境压强下点火时, 由于压强影响推进剂热解气体的扩散, 导致火焰的亮度和形状有很大的差别。在空气中点燃时明显比氮气中剧烈, 在常压氮气中点火时不能形成明显的火焰形状, 氧含量对 NEPE 推进剂的燃烧过程有很大的影响。

(2) NEPE 推进剂的点火延迟时间随着环境压强的增加而减小, 当环境压强超过 0.5 MPa 时, 对点火延迟影响很小。当环境压强较高时, 推进剂表面的气相产物可以迅速达到着火所需浓度, 而当环境压强达到

一定的临界值时, 气相产物的浓度达到饱和值, 环境压强的影响就会降低。

(3) NEPE 推进剂在氮气、空气中点燃时燃速都随着环境压强的增加显著增加。当环境压强从 0.1 MPa 增加到 3.0 MPa 时, 在氮气中的燃速增高 165%, 在空气中的燃速增加 150%, 而且 NEPE 推进剂在空气中点燃时, 燃速有明显的提高, 氧含量对 NEPE 推进剂的燃速有很大的影响。

(4) 在试验压力条件下采用 Vielle 燃速公式和 Summerfield 燃速公式对 NEPE 推进剂在氮气、空气中的燃速进行拟合, 发现 Vielle 燃速公式更适用于表征 NEPE 推进剂在 0.1~3.0 MPa 下的燃速特性。

参考文献:

- [1] LUCA L, SHIMADA T, SINDITSKII V P, et al. Chemical Rocket Propulsion [M]. Springer International Publishing, 2017 (Chapter 8): 191-233.
- [2] 谭惠民. 固体推进剂化学与技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
TAN Hui-ming. Solid propellant chemistry and technology [M]. Beijing Institute of Technology Press, 2015.
- [3] 侯宇菲, 许进升, 古勇军, 等. 基于内聚力法则的高能硝酸酯增塑聚醚推进剂开裂过程细观模型 [J]. 兵工学报, 2020, 41(11): 2206-2215.
HOU Yu-fei, XU Jing-sheng, GU Yongjun, et al. Mesoscopic model of cracking process of NEPE propellant based on cohesive zone model [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(11): 2206-2215.
- [4] LI L, CHEN X, ZHOU C, et al. Experimental investigation on laser ignition and combustion characteristics of NEPE propellant [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2017, 42(9): 1095-1103.
- [5] DAVERNAS A. Solid rocket propulsion technology [J]. *Solid Rocket Propulsion Technology*, 1993: 603-606.
- [6] 郝海霞, 裴庆, 赵凤起, 等. 固体推进剂激光点火性能研究综述 [J]. 含能材料, 2009, 17(4): 491-498.
HAO Hai-xia, PEI Qing, ZHAO Feng-qi, et al. Summarization of laser ignition characteristics of solid propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(4): 491-498.
- [7] VILYUNOV V N, ZARKO V E. Ignition of solids [J]. *Journal of Thermal Analysis*, 1989, 35(1): 285-285.
- [8] ALI A N, SON S F, SANDER R K, et al. Ignition dynamics of high explosives [R]. AIAA, 1999, 36(1): 11-14.
- [9] WEINROTTER M, KOPECEK H, WINTNER E, et al. Application of laser ignition to hydrogen-air mixtures at high pressures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, 30(3): 319-326.
- [10] PHUOC T. Laser-induced spark ignition fundamental and applications [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2006, 44(5): 351-397.
- [11] ULAS A, KUO K K. Laser-induced ignition of solid propellants

- for gas generators[J]. *Fuel*, 2008, 87(6):639-646.
- [12] Medvedev, Valerii, Tsipilev, et al. Effect of ammonium perchlorate and aluminum composition density on characteristics of laser ignition[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2018, 43(1):1-5.
- [13] MEDVEDEV V, TSIPILEV V, RESHETOV A, et al. Conditions of millisecond laser ignition and thermostability for ammonium perchlorate/aluminum mixtures[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2017, 42(3):243-246.
- [14] 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.
XIANG Heng-sheng, CHEN Xiong, ZHOU Chang-sheng, et al. Effect of environment oxygen content and pressure on the combustion of aluminum-magnesium fuel-rich propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(3):191-197.
- [15] LI L B, CHEN X, MUSA O, et al. The Effect of Pressure and oxygen concentration on the ignition and combustion of aluminum-magnesium fuel-rich propellant [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 76:394-401.
- [16] 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.
LAI Hua-jin, CHEN Xiong, ZHOU Chang-sheng, et al. Laser ignition and combustion characteristics of Al/Mg fuel-rich propellant at subatmospheric pressures[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(10):817-821.
- [17] 刘高亮,吴浩然,王月丽,等.改性双基推进剂辐射点火及燃烧性能研究[J].*兵器装备工程学报*,2021,42(7):122-126.
LIU Gao-liang, WU Hao-ran, WANG Yue-li, et al. Radiation ignition and combustion properties of modified double base propellant [J]. *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 2021, 42(7):122-126.
- [18] 王鸿美,陈雄,赵超,等.NEPE推进剂激光辐照下点火燃烧性能研究[J].*推进技术*,2015,36(8):1262-1267.
WANG Hong-mei, CHEN Xiong, ZHAO Chao, et al. Study on ignition and combustion characteristics of NEPE propellant under laser irradiation [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(8):1262-1267.
- [19] ZHU G, XIONG C, ZHOU C, et al. Study on laser ignition characteristics of NEPE propellant[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 549(2):1037-1040.
- [20] YAN X T, XIA Z X, HUANG L Y, et al. Study on the ignition process and characteristics of the nitrate ester plasticized polyether propellant [J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2020, 63(4):1-10.
- [21] 相恒升,陈雄,周长省,等.环境气体氧含量对NEPE推进剂激光点火过程的影响[J].*火炸药学报*,2016,39(3):75-79.
XIANG Heng-sheng, CHEN Xiong, ZHOU Chang-sheng, et al. Effect of oxygen content in environment gas on the laser ignition process of NEPE propellant [J]. *Journal of Explosives & Propellants*, 2016, 39(3):75-79.
- [22] YAN X T, XIA Z X, HUANG L Y, et al. Combustion of nitrate ester plasticized polyether propellants [J]. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2020, 21(10):834-847.
- [23] 郑磊,潘功配,陈昕,等.镁粉粒度对Mg/PTFE贫氧推进剂燃烧性能的影响[J].*含能材料*,2010,18(2):180-183.
ZHENG Lei, PAN Gong-pei, CHEN Xin, et al. Effect of magnesium powder particle size on combustion properties of Mg / PTFE fuel-rich propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(2):180-183.
- [24] 张炜,朱慧,方丁酉,等.低压下贫氧推进剂燃烧性能测试方法研究[J].*含能材料*,1999,7(3):118-121.
ZHANG Wei, ZHU Hui, FANG Ding-you, et al. A study on measurement of fuel-rich propellant combustion property at low pressure [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 1999, 7(3):118-121.
- [25] KAKAMI A, HIYAMIZU R, SHUZENJI K, et al. Laser-assisted combustion of solid propellant at low pressures [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2008, 24(6):1355-1360.
- [26] LI J, LITZINGER T A. Laser-driven decomposition and combustion of BTTN/GAP [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(1):166-174.
- [27] BEHRENS R, MINIER L. Thermal Decomposition Behavior of Ammonium Perchlorate and of an Ammonium Perchlorate based Composite Propellant [C]//33rd JANNAF combustion meeting, Monterey, California, United States, November 4-8, 1996.
- [28] LIAU Y C, YANG V. Analysis of RDX monopropellant combustion with two-phase subsurface reactions [J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2012, 11(4):729-739.
- [29] ROOS B D, BRILL T B, et al. Thermal decomposition of energetic materials 82. Correlations of gaseous products with the composition of aliphatic nitrate esters [J]. *Combustion & Flame*, 2002, 128:181-190.
- [30] BECKSTEAD M W, PUDUPPAKKAM K, THAKRE P, et al. Modeling of combustion and ignition of solid-propellant ingredients [J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2007, 33(6):497-551.
- [31] YAN Q L, SONG Z W, SHI X B, et al. Combustion mechanism of double-base propellant containing nitrogen heterocyclic nitroamines (II): The temperature distribution of the flame and its chemical structure [J]. *Acta Astronautica*, 2009, 64(5-6):602-614.
- [32] ZARZECKI M, QUINTIERE J G, LYON R E, et al. The effect of pressure and oxygen concentration on the combustion of PM-MA [J]. *Combustion & Flame*, 2013, 160(8):1519-1530.
- [33] 罗中平,刘桂生,孙志华.数字图像技术在燃速测量中的应用[J].*西安工业学院学报*,2002,22(1):53-55.
LUO Zhong-ping, LIU Gui-sheng, SUN Zhi-hua. Application of digital-image technology on burning rate testing [J]. *Journal of Xi'an Institute of Technology*, 2002, 22(1):53-55.
- [34] 张炜,朱慧.铝镁贫氧推进剂低压燃烧性能表征方法研究[J].*含能材料*,2002,10(3):125-127.
ZHANG Wei, ZHU Hui. Characterization methods of combustion properties of aluminum-magnesium fuel-rich propellant at low pressure [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2002, 10(3):125-127.

Ignition and Combustion Characteristics of NEPE Propellant in Nitrogen and Air

TU Cheng-yin¹, CHEN Xiong¹, ZHOU Chang-sheng¹, ZHANG Bei-chen¹, LI Lian-bo²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing 210023, China)

Abstract: The ignition and combustion characteristics of NEPE propellant were studied based on a CO₂ laser ignition test platform established, in which the combustion processes of NEPE propellant in different gas environments were photographed using a high-speed camera and the ignition delay times of NEPE propellant were measured under the pressure of 0.1–3.0 MPa in nitrogen and air through a signal acquisition system. The results show that the ambient pressure and gas environment strongly affect the ignition and combustion process of NEPE propellant. The combustion of NEPE propellant becomes more intense as the increase of ambient pressure, and the burning of NEPE propellant appears more violent in air as compared to that in nitrogen. The ignition delay time of NEPE propellant decreases with the ambient pressure increases in the range of 0.1 MPa to 3.0 MPa. Specifically, the reduction in ignition delay time of NEPE propellant is observed from 0.51 s to 0.29 s in nitrogen and from 0.32 s to 0.18 s in air. However, when the ambient pressure exceeds 0.5 MPa, the influence of the ambient pressure on the ignition delay time becomes insignificant. In addition, the burning rate of NEPE propellant is also found to be effectively affected by the ambient pressure. With the ambient pressure increases from 0.1 MPa to 3.0 MPa, the enhancement in burning rate of NEPE propellant can be seen from 1.71 mm·s⁻¹ to 4.54 mm·s⁻¹ in nitrogen and from 2.51 mm·s⁻¹ to 11.4 mm·s⁻¹ in air, and thus a stronger increase in the burning rate is observed in air. Finally, the experimental data of burning rate were fitted by an empirical formula, which indicates the Vieille burning rate formula is more suitable for reproducing the burning rate characteristics of NEPE propellant especially at 0.1–3.0 MPa.

Key words: NEPE solid propellant; laser ignition; nitrogen; air; combustion characteristic

CLC number: TJ55; V435

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021326

(责编:姜梅)