

文章编号: 1006-9941(2017)12-0976-07

## 不同环境压强下炭黑含量对聚乙烯点火和燃烧性能的影响

杨海涛, 陈雄, 相恒升, 巩伦昆, 黄波

(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了获得炭黑质量分数和环境压强对固体燃料聚乙烯点火和燃烧性能的影响,加工了不同组分配比的固体燃料样品。以 CO<sub>2</sub> 激光器作为点火源研究了它们的点火和燃烧特性。用高速摄影仪记录实验过程。用扫描电子显微镜观测了燃烧后的固体燃料表面形貌。分析了不同环境压强下不同组分配比固体燃料的点火燃烧过程、点火延迟时间和燃速。结果表明,固体燃料聚乙烯的点火过程为典型的气相点火,燃烧火焰属扩散火焰。点火延迟时间随着炭黑的加入急剧缩短,当炭黑质量分数大于 20% 时,炭黑质量分数的增加对点火延迟时间的影响很小。点火延迟时间随着环境压强的增加缩短,当环境压强大于 0.2 MPa 时,环境压强的增加对点火延迟时间的影响也很小。根据实验结果,采用最小二乘法,拟合得到了环境压强为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 MPa 时点火延迟时间与炭黑质量分数的函数关系式。固体燃料的燃速随炭黑质量分数的增大而减小,随压强的增大而增大,当炭黑质量分数大于 5% 时,炭黑质量分数是影响固体燃料燃速的主要因素。

**关键词:** 聚乙烯; 炭黑含量; 环境压强; 点火延迟时间; 燃速

**中图分类号:** TJ55; V512

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.12.002

### 1 引言

固体燃料冲压发动机 (Solid Fuel Ramjet, SFRJ) 具有结构简单、比冲高、使用安全等优点,是一种具有广阔应用前景的动力推进系统<sup>[1]</sup>。当前, SFRJ 技术研究中应用的固体燃料主要有聚甲基丙烯酸甲酯 (Polymethyl Methacrylate, PMMA)、聚乙烯 (Polyethylene, PE) 和端羟基聚丁二烯 (Hydroxyl-Terminated Polybutadiene, HTPB) 等碳氢类固体燃料和含有颗粒 (金属颗粒铝、镁和非金属颗粒硼等) 的贫氧推进剂。对固体燃料点火和燃烧性能进行研究,对于揭示固体燃料的点火和燃烧机理、推动固体燃料的工程应用和研发新型固体燃料具有非常重要的意义。

从 20 世纪 60 年代至今,已经有国内外专家对固体燃料的点火性能进行了相关研究<sup>[2]</sup>。Zarzecki 等<sup>[3]</sup>对 PMMA 在低压和低氧浓度环境中的燃烧特性进行了研究,结果表明:环境压强为 0.018 ~ 0.1 MPa、环境氧浓度为 12% ~ 21% 时, PMMA 的燃

速受环境压强的影响较小,且与环境压强和环境氧浓度都呈指数关系,但在低压环境中对流换热损失减少,使点火延迟时间缩短。Hedman<sup>[4]</sup>采用激光作为点火源,对添加了炭黑、金属颗粒和少量氧化剂的 HTPB 燃速进行了研究,结果表明:在燃料表面,金属颗粒出现了烧结现象,炭黑会出现积聚现象,燃料表面分解层的组分是影响燃速的主要因素。聂芝侠等<sup>[5]</sup>研究了不同组分的铝镁贫氧推进剂的燃烧性能,结果表明:燃速随氧化剂高氯酸铵 (Ammonium perchlorate, AP) 粒度的增加而增加,随氧化剂高氯酸钾 (KP) 含量的增加而减少,金属含量对燃速的影响较大,而金属 Mg/Al 含量的比值对燃速的影响较小。王鸿美等<sup>[6]</sup>研究了激光点火方式对硝酸酯增塑聚醚 (NEPE) 高能固体推进剂在不同点火热流密度情况下的点火性能,结果表明:在热流密度小于  $6.7 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  时,点火延迟时间随热流密度的增加明显缩短,而热流密度大于该值时,点火延迟时间受热流密度的影响很小。

固体燃料 PE 具有力学性能好、机械加工性能优、化学稳定性高、成本低廉等一系列特点,而且燃烧产物主要是二氧化碳和水,增强发动机的隐身性,在国内外被广泛应用于 SFRJ 燃烧机理研究<sup>[7-10]</sup>。但是固体燃料 PE 在 SFRJ 中燃烧时会出现点火困难、燃烧不稳定等现象。根据 Metochianakis 等<sup>[11]</sup>的研究, SFRJ 工作过程中,通过辐射传热反馈到固体燃料燃面的热量至

收稿日期: 2017-02-20; 修回日期: 2017-04-10

基金项目: 总装备部预先研究项目 (404040301)

作者简介: 杨海涛 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事固体燃料冲压发动机设计研究。e-mail: 1378438045@qq.com

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: chengxiong@njjust.edu.cn

少占总反馈热量的 15%，而炭黑 (Carbon Black) 是一种典型的增强辐射吸热系数的固体可燃物。在固体燃料 PE 中添加炭黑，是一种提高火焰对燃烧表面的热反馈强度、增强燃烧稳定性的重要措施。国内外在该方面的研究很有限，不能清晰地揭示炭黑对固体燃料点火和燃烧性能的影响。为此，本研究设计并加工了固体燃料加工装置和样品药柱加工装置，制备了不同炭黑质量分数的固体燃料药柱，进行了一系列实验，揭示了固体燃料 PE 的点火机理，并进一步研究了炭黑质量分数和环境压强对固体燃料点火和燃烧性能的影响。

## 2 实验设备及方法

### 2.1 样品制备

实验用样品的组分配比见表 1。

表 1 实验样品的组分配比

Table 1 Composition ratio of experimental samples

sample	mass fraction/%		density /g · cm <sup>-3</sup>	density standard deviation/g · cm <sup>-3</sup>
	HDPE	carbon black		
S1	100	0	0.966	0.008
S2	95	5	0.977	0.011
S3	90	10	0.991	0.005
S4	80	20	1.016	0.006
S5	70	30	1.051	0.006
S6	60	40	1.087	0.009
S7	50	50	1.122	0.011

样品中使用的聚乙烯粉为美国埃克森美孚公司生产的高密度聚乙烯 (HDPE) 牌号 HMA-018，粒径 100 目 (154 μm)；炭黑为天然枣木炭粉，使用 200 目标准分样筛分样，保证炭黑粒径小于 200 目 (74 μm)。样品制备时，将 HDPE 粉和炭黑放入 V 型双臂混料机中均匀混合，然后放入加工模具 (如图 1a 所示) 中，将模具放在恒温熔锡炉中恒温 225 °C 保持 30 min，将模具取出放在压力机中，恒定施加 3 MPa 的压力 30 min，最后进行退模，取出成型的固体燃料。固体燃料冷却至常温后，使用车床将固体燃料加工成尺寸为  $\Phi 24$  mm × 6 mm 的柱状，然后使用样品加工冲头 (如图 1b 所示) 将固体燃料加工成  $\Phi 5$  mm × 6 mm 的柱状样品 (如图 1c 所示)。对所加工的固体燃料进行了密度测量，结果如表 1 所示，计算了各组分配比固体燃料密度的标准差，结果表明各组分固体燃料密度标准差均小于 0.011 g · cm<sup>-3</sup>。

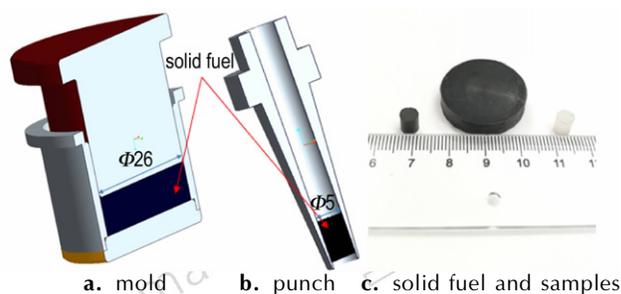


图 1 样品加工模具和样品药柱

Fig. 1 Sample processing mold and sample grain

### 2.2 实验系统

实验系统主要由 CO<sub>2</sub> 激光器、燃烧室、光路装置、控制装置和数据采集装置组成，其组成示意图如图 2 所示。

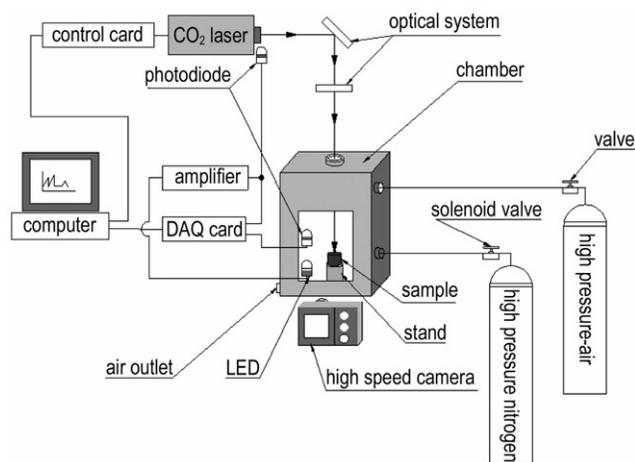


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental device

CO<sub>2</sub> 激光器作为点火源，出光功率可调，光斑直径为 3.7 mm。燃烧室为 102 mm × 120 mm × 240 mm 的立方体空腔，前后两侧有 40 mm × 70 mm 的钢化玻璃视窗，顶部有一个直径为 20 mm 的通光孔，配合光路系统调节激光光斑直径；燃烧室和高压气瓶相连，通过调节燃烧室内的充气量调节燃烧室压强，压强数值在减压阀表盘上读取。控制系统由计算机和控制卡组成，通过控制系统控制激光加载功率和加载时间。考虑到激光传播过程中激光能量的损耗，每次实验前使用 CO<sub>2</sub> 激光功率计对激光功率进行标定。数据采集系统由两个光电二极管、数据采集卡和计算机组成。两个光电二极管分别采集激光出光信号和固体燃料火焰信号，信号放大器将两路信号转化为电压信号并放

吹离固体燃料燃面,而剩余部分炭黑在燃面处积聚,形成炭黑层,炭黑层的厚度随着炭黑质量分数的增加而增加。炭黑层阻止其下方的炭黑脱离固体燃料燃面,这也是图 4a 中样品 S2、S3、S5、S7 分在 440, 384,

296, 204 ms 时刻分解气体顶部形成“黑帽子”的原因。而且,随着炭黑质量分数的增加,炭黑层厚度随之增加,影响火焰反馈热进一步向固体燃料内部传导,HDPE 分解速率减慢,稳定燃烧火焰高度更低。

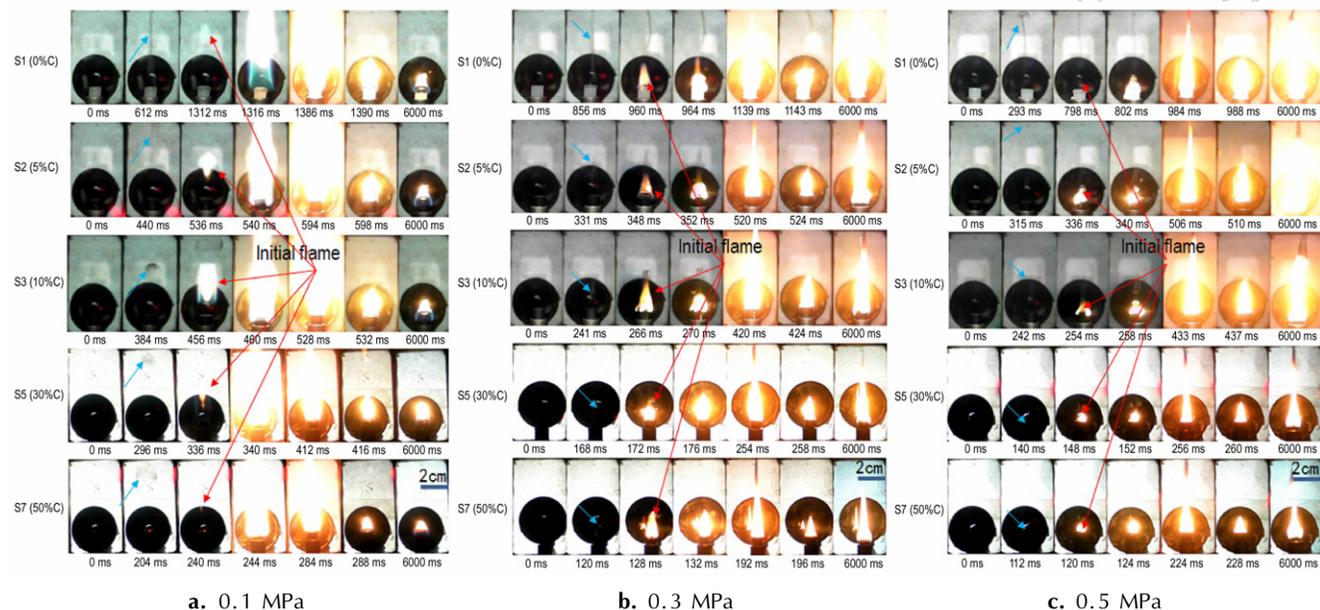


图 4 不同环境压强下固体燃料点火和燃烧过程

Fig. 4 The ignition and combustion process of solid fuel at different environmental pressures

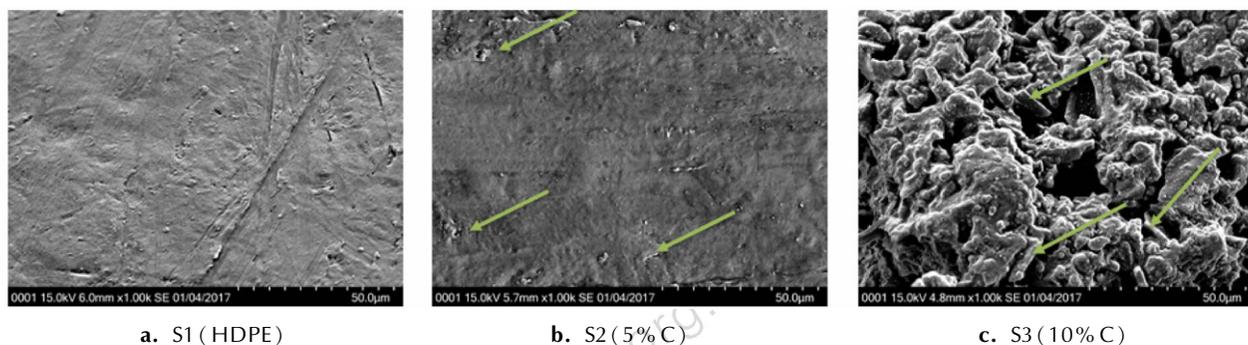


图 5 固体燃料燃烧后表面形貌

Fig. 5 Surface morphology of solid fuel after combustion

根据图 4 进一步分析,环境压强对不同组分配比固体燃料点火和燃烧的影响相似。对比分析图 4 中 S2 样品在环境压强为 0.1, 0.3, 0.5 MPa 情况下的点火和燃烧过程,随着环境压强的增大,固体燃料初始分解时间缩短,分解燃气扩散上升速度减慢,初始火焰更加靠近固体燃料燃面,火焰传播速度减慢,稳定燃烧火焰高度增加,燃烧火焰伴随着更多的絮状炭黑,火焰中的黄色光增强,火焰更加明亮,火焰顶部聚集更多的炭黑,激光热流对固体燃料燃烧的影响减弱。上述现象的原因是,随着环境压强的增加,分解气体在空气中的扩散混合速率减慢,在燃面处最先达到点火氧浓度和

点火温度,初始火焰出现在固体燃料燃面处,并且缓慢向上扩散。气相反应高温区域更加靠近燃面,增强了火焰对固体燃料的热反馈,固体燃料的分解速率加快,点火热源的作用减弱,同时固体燃料分解速率增大、稳定燃烧火焰更高。而火焰中心区域缺乏足够的氧气,分解气体不能充分燃烧,会有中间反应产物炭黑生成,这也是火焰呈黄色的主要原因<sup>[14]</sup>。

### 3.2 不同环境压强下炭黑质量分数对点火延迟时间的影响

不同环境压强下点火延迟时间随炭黑质量分数变化情况如图 6 所示。由图 6 可以看出,在相同的环境

压强下,随着炭黑的加入,点火延迟时间急剧缩短;当炭黑质量分数大于 20% 时,随着炭黑质量分数的增加,点火延迟时间缓慢缩短,并很快趋于平缓;在炭黑质量分数相同情况下,随着压强的升高,固体燃料的点火延迟时间急剧缩短,当环境压强高于 0.2 MPa 时,压强增大对点火延迟时间的影响很小。该现象的原因是,随着炭黑的加入,使固体燃料辐射吸收系数增加,单位时间内吸收了更多的激光辐射能,加快了固体燃料的受热分解,使点火延迟时间急剧缩短。虽然炭黑会提高辐射吸热能力,但是这种提高效果存在极限,随着炭黑质量分数的增加,提高效果逐渐减弱,炭黑质量分数对点火延迟时间的影响也越来越弱。

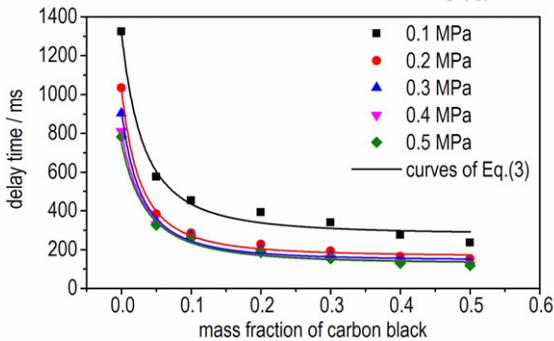


图 6 不同炭黑质量分数和环境压强下的点火延迟时间

Fig. 6 Ignition delay time under different mass fraction of carbon black and environmental pressures

由上述分析可知,影响固体燃料的点火延迟时间的因素主要包括固体燃料表面热量积累时间、固体燃料分解时间和分解气体扩散时间。根据文献[15]可知,固体燃料 PMMA 点火延迟时间与激光热流密度的关系符合式(2):

$$t_{ig} = \frac{A}{q^2} + B \quad (2)$$

式中,  $t_{ig}$  为点火延迟时间, ms;  $q$  为激光热流密度,  $W \cdot cm^{-2}$ ;  $A$ 、 $B$  为常数。

由于炭黑的加入主要增加固体燃料对激光能量吸收的强度,故引入修正系数  $k$  对热流密度进行修正,得到点火延迟时间  $t_{ig}$  与炭黑质量分数  $\varphi_c$  的函数关系式:

$$t_{ig} = \frac{a}{(260 + k \times \varphi_c)^2} + b \quad (3)$$

式中,  $t_{ig}$  为点火延迟时间, ms;  $\varphi_c$  为炭黑质量分数;  $a$ 、 $b$ 、 $k$  为常数。

根据公式(3),采用最小二乘法对图 6 中不同环境压强下点火延迟时间与炭黑质量分数的关系进行拟

合,分别得到在不同环境压强下的拟合曲线(图 6 中曲线)和拟合参数(表 2)。

表 2 不同环境压强下点火延迟时间与炭黑质量分数的拟合结果  
Table 2 Fitting results of ignition delay time with mass fraction of carbon black at different environmental pressures

$p$ /MPa	$a$	$b$	$k$	correlation coefficients
0.1	$7.06 \times 10^7$	277.80	$4.10 \times 10^3$	0.995
0.2	$5.87 \times 10^7$	164.89	$4.84 \times 10^3$	0.999
0.3	$5.25 \times 10^7$	143.66	$4.62 \times 10^3$	0.998
0.4	$4.59 \times 10^7$	129.66	$3.93 \times 10^3$	0.998
0.5	$4.22 \times 10^7$	125.67	$3.61 \times 10^3$	0.997

分析表 2 中不同环境压强下点火延迟时间与炭黑质量分数关系的拟合结果可知,常数  $a$  和  $b$  都随着压强的增大而减少,且满足指数关系,即  $a \propto p^{-3.082}$ ,  $b \propto p^{-0.548}$ 。

### 3.3 不同环境压强下炭黑质量分数对燃速的影响

环境压强为 0.1, 0.3, 0.5 MPa 情况下,不同组分配比固体燃料的燃速如图 7 所示。根据图 7 可知,相同环境压强时,固体燃料的燃速随炭黑质量分数的增大而减小。炭黑质量分数相同时,固体燃料的燃速随环境压强的增大而增大。当炭黑质量分数增加大于 5% 时,固体燃料的燃速随压强的增大缓慢增大,此时炭黑质量分数为影响固体燃料燃速的主要因素。这是因为,以 HDPE 为基底的固体燃料的燃烧方式为扩散燃烧,而炭黑只能部分随着分解气体与空气掺混,随着燃面的退移,剩余部分炭黑逐渐在燃面积聚,形成炭黑层(如图 5b 和图 5c 所示),影响火焰反馈热进一步向固体燃料内部传导,固体燃料中 HDPE 的分解速率降低。随着环境压强的增大,分解气体扩散速率减慢,气相反应区变薄,使高温区更加接近燃面,增强了高温火焰对固体燃料的热反馈,固体燃料分解速率加快。随着炭黑质量分数的增加,炭黑层的厚度增加更快,进一步影响火焰对固体燃料的热反馈,固体燃料中 HDPE 的分解速率降低,所以当炭黑质量分数大于 5% 时,固体燃料的燃速随压强的增大缓慢增大,炭黑质量分数成为影响固体燃料燃速的主要因素。通过计算可知,样品 S2(炭黑为 5%) 在环境压强分别为 0.1, 0.3, 0.5 MPa 情况下,燃速比在相同环境压强时样品 S1 分别降低 13.76%, 20.76% 和 26.07%, 而文献[4]表明当在 HTPB 中添加质量分数为 1% 的炭黑时,燃面退移率降低 27%, 产生这种差别的原因可能是 HTPB 与 HDPE 的燃烧性能不同、实验工况不同等。

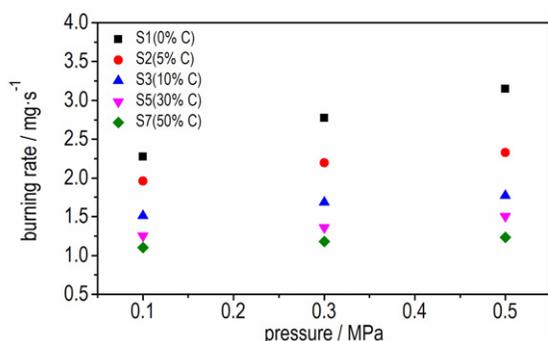


图7 不同炭黑质量分数和环境压强下的燃速

Fig. 7 Burning rate under different mass fraction of carbon black and environmental pressures

此外,本研究中固体燃料是在辐射作用下点火燃烧,由于炭黑的作用辐射吸收系数增加,点火延迟时间缩短;扩散过程主要为自然对流驱动,环境压强的增加使得火焰高温区更靠近燃料燃面,使热量反馈增强。在SFRJ工作过程中,高温燃气与固体燃料之间为强迫对流换热,并且对固体燃料表面也存在着一定的剪切作用,炭黑颗粒可能不会积聚在固体燃料表面,炭黑对点火燃烧过程的影响可能与本研究得到的成果存在一些差别。因而,在本文研究基础上,还需要对固体燃料在强迫对流环境下的点火燃烧过程进行研究,进一步分析环境压强和炭黑质量分数对固体燃料的点火燃烧的影响。

## 4 结论

(1) 以高密度聚乙烯为基底添加炭黑固体燃料的点火方式为典型的气相点火,火焰属扩散火焰。随着炭黑质量分数的增加,HDPE初始分解时间缩短,但是在燃烧表面形成的炭黑层厚度增加;随着压强的升高,初始火焰更加靠近燃烧表面,火焰传播速度减慢,火焰中新生成炭黑和黄色光的比例增加;压强是影响稳定火焰高度的主要因素。

(2) 随着炭黑的加入,固体燃料的点火延迟时间急剧缩短,当炭黑质量分数大于20%时,炭黑质量分数对点火延迟时间影响很小;随着压强的增大,点火延迟时间缩短,但当环境压强大于0.2 MPa时,压强大小对点火延迟时间的影响很小;当激光加载热流密度为 $260 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、炭黑质量分数小于50%、环境压强为0.1~0.5 MPa时,点火延迟时间 $t_{ig}$ 和炭黑质量分数 $\varphi_C$ 符合函数关系 $t_{ig} = a / (260 + k \times \varphi_C)^2 + b$ ,常数 $a$ 和 $b$ 都随着压强的增大而减少,且满足指数关系,即

$$a \propto p^{-3.082}, b \propto p^{-0.548}$$

(3) 环境压强相同时,固体燃料的燃速随炭黑质量分数的增大而减小;炭黑质量分数相同时,固体燃料的燃速随环境压强的增大而增大;当炭黑质量分数增加大于5%时,炭黑质量分数为影响固体燃料燃速的主要因素。

(4) 本研究中分解气体扩散过程主要为自然对流驱动,而SFRJ中高温燃气与固体燃料之间为强迫对流换热,并且对固体燃料表面也存在着一定的剪切作用,炭黑对点火燃烧过程的影响可能与本研究得到的成果存在一些差别,还需要进一步研究在强迫对流环境下环境压强和炭黑质量分数对固体燃料点火燃烧的影响。

## 参考文献:

- [1] Krishnan S, Philmon George. Solid fuel ramjet combustor design [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 1998, 34(3): 219-256.
- [2] 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.
- [3] Mariusz Zarzecki, James G Quintiere, Richard E Lyon, et al. The effect of pressure and oxygen concentration on the combustion of PMMA [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160: 1519-1530.
- [4] Trevor D Hedman. Radiation-induced pyrolysis of solid fuels for ramjet application [J]. *Propulsion and Power Research*, 2016, 5(2): 87-96.
- [5] 聂芝侠, 李葆萱, 胡松起, 等. 铝镁富燃推进剂燃烧性能研究 [J]. *固体火箭技术*, 2008, 31(3): 243-246.  
NIE Zhi-xia, LI Bao-xuan, HU Song-qi, et al. Study on combustion performance of magnesium-aluminum fuel-rich propellants [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2008, 31(3): 243-246.
- [6] 王鸿美, 陈雄, 赵超, 等. NEPE推进剂激光辐照下点火性能研究 [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.
- [7] Amnon Netzer, Alon Gany. Burning and flame holding characteristics of a miniature solid fuel ramjet combustor [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1991, 7(3): 357-363.
- [8] Schulte G. Fuel regression and flame stabilization studies of solid-fuel ramjets [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1986, 2(4): 301-304.
- [9] 谢爱元. 固体燃料冲压发动机燃烧特性的理论与实验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015.  
XIE Ai-yuan. Research of experiment about the combustion characteristic of solid fuel ramjet [D]. Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [10] 陈雄, 成红刚, 周省长, 等. 聚乙烯在固体燃料冲压发动机中的燃速影响因素研究 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(11): 1783-1789.

- CHEN Xiong, CHENG Hong-gang, ZHOU Chang-sheng, et al. Research on influence of selected factors on burning rate of polyethylene in solid fuel ramjet[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(11): 1783–1789.
- [11] Metochianakis M E, Netzer D W. Modeling solid-fuel ramjet combustion including radiation heat transfer to the fuel surface[J]. *Journal of Spacecraft and Rocket*, 1983, 20(8): 405–406.
- [12] K Suresh Kumar Reddy, Pravin Kannan, et al. Thermal pyrolysis of polyethylene in fluidized beds; review of the influence of process parameters on product distribution[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2012, 134: 1–6.
- [13] 童世唯. 煤粉燃烧中炭黑颗粒的辐射特性计算研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- TONG Shi-wei. Study on the radiative properties of soot particles in the coal of combustion[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [14] 曾怡. 低压下射流扩散火焰的燃烧特性与图像特征[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- ZENG Yi. Influence of sub-atmospheric pressure on jet diffusion flame's combustion characteristics and image parameters[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [15] 朱国强, 鞠玉涛, 周长省, 等. PMMA 激光点火特性研究[J]. 固体火箭技术, 2012, 35(2): 188–192.
- ZHU Guo-qiang, JU Yu-tao, ZHOU Chang-sheng, et al. Study on laser ignition characteristics of PMMA[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2012, 35(2): 188–192.

## Effects of Carbon Black Content on Ignition and Combustion Performance of Polyethylene at Different Environmental Pressures

YANG Hai-tao, CHEN Xiong, XIANG Heng-sheng, GONG Lun-kun, HUANG Bo

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To obtain the effects of mass fraction of carbon black and environmental pressure on the ignition and combustion performance of polyethylene, the solid fuel samples with different composition ratio were processed, their ignition and combustion characteristics were investigated by using a CO<sub>2</sub> laser as the ignition source. The experimental process was recorded with a high speed camera. The surface morphology of solid fuels after combustion were examined using scanning electron microscope. The ignition and combustion processes, ignition delay time and burning rate of solid fuel samples with different composition ratio at different environment pressures were analyzed. Results show that the ignition process of solid fuel polyethylene is a typical gas phase ignition and combustion flame is a diffusion flame. The ignition delay time shortens sharply with the addition of carbon black, when the mass fraction of carbon black is higher than 20%, the effect of increase of mass fraction of carbon black on ignition delay time is very small. The ignition delay time shortens with the increase of environment pressure, when the environment pressure is higher than 0.2 MPa, the effect of increase of environment pressure on ignition delay time also is very small. According to the experimental results, when the environment pressure is 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 MPa, the function relationship between ignition delay time and mass fraction of carbon black is fitted and obtained by using the least squares method. The burning rate of solid fuels decreases with the increase of mass fraction of carbon black, and increases with the increase of environmental pressure. The mass fraction of carbon black is the main factor affecting the burning rate of solid fuels when the mass fraction of carbon black is higher than 5%.

**Key words:** polyethylene; carbon black content; environmental pressure; ignition delay time; burning rate

**CLC number:** TJ55; V512

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.12.002

文章编号: 1006-9941(2017)12-0983-07

# 底排点火具在大气中燃烧火焰扩展特性

马龙泽, 余永刚

(南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 底部排气弹射程和纵向密集度与点火具的工作性能密切相关。采用高速录像系统和红外热像仪研究了大气环境中, 镁/聚四氟乙烯(MT)(Mg/PTFE 45/55、Mg/PTFE 55/45、Mg/PTFE 61/39)、硝酸钡( $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ )和氧化锆/氧化铅( $\text{ZrH}_2/\text{PbO}_2$  40/60)五种点火药剂在不同点火具孔径(6.5, 8 mm)下的燃烧扩展特性, 并测得七种点火具的火焰温度场分布。在实验基础上, 以基于内节点的有限体积法对 MT 点火具的燃烧射流场进行三维数值模拟, 分析了不同 MT 质量比和点火具孔径下点火具在大气中的燃烧特性参数分布规律。实验和数值结果表明:  $\text{ZrH}_2/\text{PbO}_2$  点火具会破坏底排推进剂的“平行层”燃烧规律; 提出以点火面积有效因子表示推进剂点火面积的有效程度, 并结合点燃时间综合评估点火具的点火性能, 发现 MT 质量比为 61:39, 孔径为 8 mm 的点火具性能最优; 点火具火焰最高温度区均位于喷孔的势流核上方; 镁质量分数为 0.45~0.61 时, 镁含量越小, MT 点火具燃烧场中火焰温度越高, 镁含量一定, 点火具孔径为 6.5, 8 mm 时, 较大孔径有较强烈燃烧场热对流, 较高中心轴向温度, 较大温度梯度。

**关键词:** 底排点火具; 燃烧射流; 扩展特性; 点火性能; 有限体积法

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.12.003

## 1 引言

底部排气弹通过底排装置对弹底添能加质以减小压阻来达到增程目的, 而点火散布是引起底排弹散布和射程变化的重要因素, 其和推进剂的燃烧规律均与点火具的点火性能密切相关<sup>[1]</sup>。不同的点火药和点火具结构使得点火具的工作性能具有多样性。郭锡福<sup>[2]</sup>论证了点火具对点火性能起主要作用以及点火一致性对增程减小散布的重要性, 并提出了利用底排阻力曲线确定点火时间的科学方法。张峰<sup>[3]</sup>着重分析了不同类型点火具和不同质量点火药剂在底排弹试验中所带来的影响。张炎青<sup>[4]</sup>研究了底排药剂点火过程对纵向密集度影响的简易计算方法, 并用于处理试验数据, 从而改善点火条件。吴学易<sup>[5]</sup>和丁则胜等<sup>[6]</sup>实验分析了点火具喷气孔径、装药量和点火具位置等参数对二次点火一致性的影响。潘功配<sup>[7]</sup>、王健等<sup>[8]</sup>通过点火瞬时性模拟实验, 研究了多种点火具对底排药柱点火延迟时间、点火烧蚀性和燃烧速度的影

响差异性, 更深入地了解了药柱的点火和二次点火过程。陆春义<sup>[9]</sup>采用半密闭爆发器模拟炮口压力突降过程, 研究了底排点火具在高降压速率下的瞬态燃烧特性及工作性能。张领科<sup>[10-11]</sup>建立了底排装置内弹道和外弹道计算模型, 基于独立随机假设理论, 数值分析了由于点火延迟时间、底排装置工作时间造成的一致性对射程散布的影响, 并研究了点火具射流特性对药柱点火延迟的影响。Pašagic<sup>[12]</sup>针对不同配方的底排点火药, 比较分析了气相产物组分对线性燃速、压力、潜热和点火温度等参数的影响。

点火具燃烧性能是底排增程技术的研究重点。之前的研究多是以点火具和底排推进剂共同作用下, 底排装置的工作性能为重心, 未能从点火具自身燃烧特性出发, 探讨其对底排推进剂点火的影响。为此, 本研究借助高速录像仪和红外热像仪, 通过不同点火具的燃烧实验测试, 从点火具燃烧射流扩展特性的角度分析了镁/聚四氟乙烯(MT)、硝酸钡( $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ )和氧化锆/氧化铅( $\text{ZrH}_2/\text{PbO}_2$ )三种点火药剂和喷孔直径(6.5 mm, 8 mm)对点火具燃烧特性的影响, 初步讨论了其对推进剂的点火作用, 并以基于内节点的有限体积法对 MT 点火具的燃烧场进行了数值模拟, 研究了点火药质量比和点火具孔径对点火具在大气中的燃烧特性的影响规律。

收稿日期: 2017-04-10; 修回日期: 2017-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助(51176076)

作者简介: 马龙泽(1992-), 男, 博士生, 主要从事含能固体燃烧理论与技术研究。e-mail: zxfxmlz@163.com

通信联系人: 余永刚(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事含能材料瞬态燃烧理论与技术研究。e-mail: yygjust801@163.com