

推进剂组分对固体燃料冲压发动机性能的影响

邱爽¹, 苏莹莉^{1,2}, 杨海涛^{1,3}, 陈雄¹, 周长省¹

- (1. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094;
2. 中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院, 上海 201210;
3. 中国航天科技集团有限公司 四川航天系统工程研究所, 成都 610100)

摘 要: 为研究不同组分推进剂对固体燃料冲压发动机(SFRJ)燃烧性能的影响,以添加了石蜡、炭黑以及碳纤维的聚乙烯(PE)为推进剂,采用连管点火实验装置对 SFRJ 进行了研究。用扫描电镜观测了燃烧后的燃面形貌。用三维扫描仪和数据重构方法获得了燃速三维分布。根据实验所获数据进一步计算得到不同工况下 SFRJ 工作性能参数。结果表明:加入 5% 的碳纤维会阻碍聚乙烯基推进剂燃烧表面的机械剥蚀,影响热解过程,使其无法自持燃烧。通过燃速三维分布发现了开尔文-亥姆霍兹不稳定现象。在聚乙烯基推进剂中添加炭黑和石蜡均能够提高燃速,石蜡影响更明显。石蜡质量分数为 30%、50% 以及纯石蜡的推进剂比聚乙烯分别提高了 37.5%、51.4% 和 544%。最后拟合得到了聚乙烯基推进剂平均燃速与石蜡质量分数呈指数递增关系。

关 键 词: 固体燃料冲压发动机(SFRJ); 聚乙烯(PE); 推进剂组分; 燃速; 燃烧性能

中图分类号: V435.21 **文献标志码:** A

Influence of propellant composition on performance of solid fuel ramjet

QIU Shuang¹, SU Yingli^{1,2}, YANG Haitao^{1,3},
CHEN Xiong¹, ZHOU Changsheng¹

- (1. School of Mechanical Engineering,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Shanghai Aircraft Design and Research Institute,
Commercial Aircraft Corporation of China Limited, Shanghai 201210, China;
3. System Engineering Institute of Sichuan Aerospace,
China Aerospace Science and Technology Corporation, Chengdu 610100, China)

Abstract: In order to investigate the influence of different component propellants on the performance of solid fuel ramjet(SFRJ), experiments were conducted on connected pipe facility for ignition of a SFRJ using polyethylene(PE) with paraffin, carbon black and carbon fiber as propellant. The combustion surface morphology was observed by SEM. The three-dimensional distribution of regression rate was obtained by using three-dimensional scanner and data reconstruction method. According to the data obtained from the experiment, the performance parameters of SFRJ under different working conditions were further calculated.

收稿日期:2020-03-03

作者简介:邱爽(1993—),男,硕士生,研究方向为飞行器总体设计。

引用格式:邱爽,苏莹莉,杨海涛,等.推进剂组分对固体燃料冲压发动机性能的影响[J].航空动力学报,2020,35(9):1995-2005.
QIU Shuang,SU Yingli,YANG Haitao,et al. Influence of propellant composition on performance of solid fuel ramjet[J].
Journal of Aerospace Power,2020,35(9):1995-2005.

Results indicated that; addition of 5% Carbon fiber could hinder the mechanical erosion of combustion surface of the polyethylene-based propellant and affect the pyrolysis process, making it impossible for self-sustaining combustion. The Kelvin-Helmholtz instability was found through the three-dimensional distribution of burning rate. Adding carbon black and paraffin to the polyethylene-based propellant could improve the regression rate, and the influence of paraffin was more obvious. The mass fraction of paraffin of 30%, 50% paraffin and pure paraffin were 37.5%, 51.4% and 544% higher than those of PE respectively. Finally, the relationship between the average regression rate of the polyethylene-based propellant and the mass fraction of paraffin was obtained.

Key words: solid fuel ramjet (SFRJ); polyethylene (PE); propellant composition; regression rate; combustion performance

固体燃料冲压发动机(SFRJ)因其安全性高、可靠性好、成本低廉、结构简单等特点,在世界范围内吸引了广泛关注^[1]。多数国家都针对 SFRJ 相关技术相继开展了研究工作。SFRJ 工作性能在很大程度上依赖其推进剂的燃烧性能,而在 SFRJ 工作过程中,推进剂燃烧性能对推进剂本身性能、发动机的结构、飞行状态以及空域变化等因素影响较为敏感。因此,针对固体燃料冲压发动机的推进剂燃烧性能进行研究,对于研发新型推进剂与揭示其燃烧影响规律有重要意义。

目前,应用于固体燃料冲压发动机(SFRJ)燃烧特性研究的推进剂主要有端羟基聚丁二烯(HTPB)、聚乙烯(PE)、聚苯乙烯(PS)等烃类固体推进剂。其中聚乙烯(PE)以环保无毒、来源普遍、成本低廉且易于加工制造而被广泛应用于 SFRJ 的燃烧特性研究中。国内外在 SFRJ 聚乙烯等固体燃料推进剂燃烧特性研究方面取得了一系列成果^[2-5]。但聚乙烯等固体燃料推进剂存在能量较低、燃速偏低等缺点。推进剂正在向高能化方向发展,为了增加固体燃料的能量,许多学者在固体燃料中加入高能颗粒,如金属铝、镁以及硼等。但金属颗粒的加入会出现颗粒烧结、燃烧不完全等负面作用,硼有剧毒且制造成本高昂。

石蜡是一种烃类含能材料,低熔点牌号的石蜡类燃料具有较高的燃面退移速率和质量消耗率^[6]。唐乐等^[7]发现石蜡平均退移速率是 HTPB 的 296%,其对应的绝热火焰温度为 3600 K,略低于 HTPB,理论比冲约为 354 s,略高于 HTPB。石蜡具有与传统烃类燃料相当的密度比冲性能^[8],是混合发动机的理想能源^[9]。Akhter 等^[10]建立了石蜡-HTPB 混合燃料燃速的幂律模型,发现石蜡的加入使 HTPB 燃料燃速提升了

352.8%。Christian 等^[11]提出,与 HTPB 相比,石蜡能降低混合发动机的制造成本,为低成本运载火箭提供可能。Metochianakis 等^[12]发现推进剂表面传热特性是影响药柱燃烧性能的一个重要因素,炭黑与碳纤维都可以增大推进剂表面辐射吸热系数及热扩散系数,提高传热特性。杨海涛^[13]发现,添加炭黑的聚乙烯推进剂与聚乙烯推进剂相比可缩短发动机点火时间,有效改善发动机燃烧稳定性及工作特性。

综上所述,国内外针对向聚乙烯固体推进剂中加入石蜡、炭黑以及碳纤维的研究较少,因此对分别添加有石蜡、炭黑以及碳纤维的聚乙烯推进剂燃烧性能的研究具有重要的探索意义。本文在发动机结构与来流条件不变的情况下,对上述不同组分种类以及不同组分质量分数的固体推进剂燃烧特性进行了实验研究,研究结果对 SFRJ 新型推进剂的设计与优化具有重要的参考价值。

1 实验固体推进剂的制备

1.1 制备原料及方法

本文用高密度聚乙烯混合石蜡、炭黑以及碳纤维来做推进剂。如图 1 所示,高密度聚乙烯的原料为美国埃克森美孚公司(ExxonMobil)生产的高密度聚乙烯(HDPE/HMA-016)颗粒,粒径为 154 μm ;石蜡为辽宁抚顺石化公司生产的昆仑牌 58 全精炼石蜡颗粒;炭黑为精选木炭粉,粒径为 74 μm ;碳纤维为日本东丽公司(TORAY)生产的 T700SC-12 K 碳纤维长丝经特殊处理获得的等长细微颗粒,粒径为 74 μm 。

以制备添加石蜡的聚乙烯推进剂为例。首先将石蜡颗粒放入粉碎机打出粉,按照需要的组分配比将石蜡粉、聚乙烯粉放入搅拌机掺混,将混合

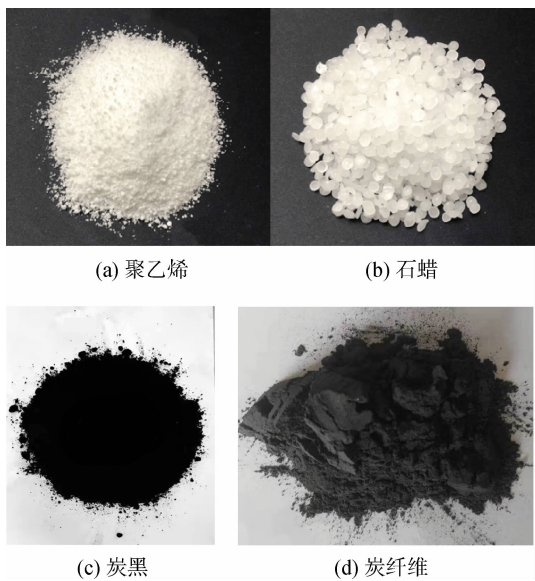


图 1 聚乙烯、石蜡、炭黑及碳纤维

Fig. 1 Polyethylene, paraffin, carbon black and carbon fiber

原料放入套有锡箔纸的制备模具。然后将制备模具放入融化装置进行加热,使混合原料完全熔化混合,取出制备模具,用液压装置给融化的固体推进剂加以适当压力并冷却、退模,取出圆柱形推进剂。

1.2 推进剂评估

制备的固体推进剂外径为 115 mm,长度为 300 mm,再将固体推进剂机加工成符合实验工况要求的标准单孔管状样品。对制备得到的固体推进剂进行了密度评估,如表 1。通过凸透镜观察其内外表面,发现其密实度良好,没有明显缩孔和裂纹,如图 2 所示。

表 1 中 HDPE 代表高密度聚乙烯,PW 代表石蜡,CB 代表炭黑,CF 代表碳纤维,数字代表组分的质量分数,如 30PW/HDPE 表示添加石蜡质量分数为 30%的高密度聚乙烯固体推进剂。

固体推进剂密度通过质量和体积测量计算得到。由于每一种组分配比的固体推进剂都做了多件以备用,可以计算出各组分配比的固体推进剂密度标准差 $\sigma(\rho)$

$$\sigma(\rho) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\rho_i - \bar{\rho})^2}$$

(1)

其中 N 为推进剂件数, ρ_i 为某一推进剂的密度, $\bar{\rho}$ 为推进剂的平均密度。表 1 结果表明各组分质量分数固体推进剂密度标准差均小于 10 kg/m^3 (0.01 g/cm^3),满足工程实验应用。

表 1 密度评估

Table 1 Density assessment

推进剂 编号	推进剂 组分	密度 ρ / (kg/m^3)	密度标准差 $\sigma(\rho)/(\text{kg/m}^3)$
S1	100HDPE	956	3.68
		951	
		947	
S2	30PW/HDPE	928	3.74
		925	
		919	
S3	50PW/HDPE	895	6.94
		912	
		903	
S4	100PW	867	7.79
		886	
		875	
S5	5CB/HDPE	987	8.58
		966	
		976	
S6	5CF/HDPE	943	9.90
		967	
		958	



图 2 实验推进剂实物图

Fig. 2 Practicality picture of experiment propellant

2 实验方案及数据处理方法

2.1 实验方案

实验装置主要包括直连式实验系统,实验发动机等^[14],如图 3 及图 4 所示。直连式实验系统主要模拟激波后来流状况,包括供气系统、补氧系统、加热系统、燃烧中止系统、控制系统等。保证气源稳定供气后,采用先补氧后燃烧的方式以保证来流空气中氧气质量分数平衡,采用航空煤油作为燃料将空气加热到预定温度。空气来流量

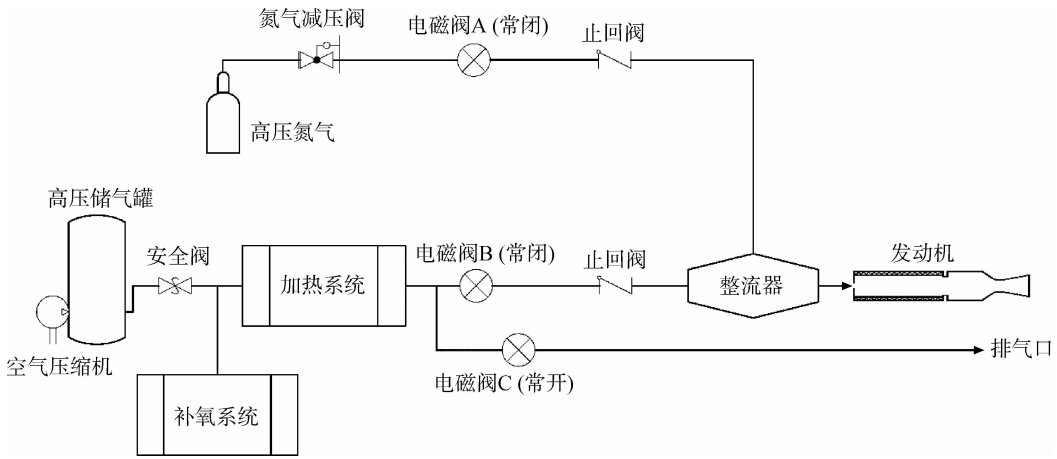


图 3 直连式实验系统

Fig. 3 Direct connection experiment system

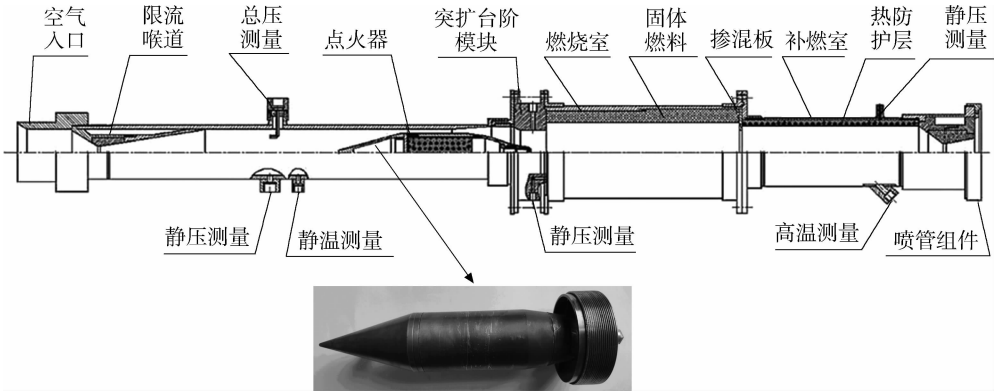


图 4 实验发动机及点火器

Fig. 4 Experiment engine and igniter

由系统设定的实验总压、总温及限流喉道共同限制。如图 3,当总压、总温等参数达到设定条件并稳定后,开启电磁阀 B 同时电磁阀 C 关闭,点火,开始实验,实验结束后关闭电磁阀 B 同时打开电磁阀 A 和 C,气流通过另一路排出,氮气通入实验发动机,熄火。本实验中点火器工作时间为 3 s。另外,在燃烧室尾部设置了压力与温度传感

器,以获取燃烧室静温及静压。

2.2 实验工况

为了模拟发动机在海平面马赫数为 2.0 时的飞行工况,本实验设置来流的总压为 0.78 MPa,总温为 540 K。对不同组分种类以及不同组分质量分数的固体推进剂设计实验工况,如表 2 所示。

表 2 实验工况

Table 2 Experimental condition

工况	燃料	$w/\%$	L/mm	d_p/mm	d_{in}/mm	d_t/mm	$\dot{m}_{\text{air}}/(\text{kg/s})$
1	100HDPE	0	300	70	40	24.2	0.3
2	30PW/HDPE	30	300	70	40	24.2	0.3
3	50PW/HDPE	50	300	70	40	24.2	0.3
4	100PW	100	300	70	40	24.2	0.3
5	5CB/HDPE	5	300	70	40	24.2	0.3
6	5CF/HDPE	5	300	70	40	24.2	0.3

表 2 中 w 代表除高密度聚乙烯以外组分的质量分数,如 100HDPE 表示高密度聚乙烯质量分数为 100% 的固体推进剂。 L 代表推进剂药柱长度, d_p 、 d_{in} 和 d_t 分别表示药柱内径、进气道内径与喷管喉道直径, $\dot{m}_{air}$ 表示来流空气质量流率。

2.3 数据处理方法

首先,对燃烧后的不同工况表面做了电镜扫描,获得了推进剂燃烧表面微观形貌,并初步分析了不同发动机工作过程中的燃烧机理。

其次,直连式实验系统可以直接测得来流总温 T_0 、来流总压 p_0 、补燃室压强 p_{aft} 、补燃室温度 T_{aft} 及发动机推力 F 。通过计算可以得到燃气流量 $\dot{m}_f$ 、空燃比 f 、特征速度 c^* 及比冲 I_{sp} ,从而确定发动机的燃烧性能。

燃烧效率可由以下公式计算得到:

$$\eta = \frac{c^*}{c_{th}^*} \tag{2}$$

式中 c_{th}^* 为通过热力学公式通过 NASA(美国国家航空航天局)计算程序^[5]算得的理论特征速度。

目前,在分析固体燃料冲压发动机燃速时,主要是对平均燃速 $\bar{r}$ 进行计算分析。燃烧后圆柱面的直径 d 可以通过实验前后药柱质量的变化量 Δm 、燃料密度 ρ 、燃料长度 L 以及初始内径 d_p 求得,通过燃烧时间 t_b 计算得到平均燃速^[15]为

$$\bar{r} = \frac{\sqrt{\frac{4\Delta m}{\rho \pi L} + d_p^2} - d_p}{2t_b} \tag{3}$$

最后,在实验数据处理分析时,对固体推进剂药柱内表面退移情况也进行了探索。本文基于数据重构方法获得了固体推进剂药柱内表面当地平均燃速的三维分布与二维轴向分布^[16],并依据结果对当地燃速和平均燃速进行了定性 & 定量的分析。

3 实验结果与分析

实验中直连式实验系统自动调节来流总温总压。由于受传感器与控制系统响应的限制,总温总压存在一定的小幅度波动,但波动幅度均在设定值的 2% 以内^[17]。则可认为该实验系统精度满足工程实验研究要求。

3.1 推进剂组分对燃烧性能的影响

为了研究推进剂组分对 SFRJ 发动机燃烧性能,对表 2 提到的 6 个实验工况的发动机燃烧性能相关参数进行了计算,具体计算结果见表 3。根据化学反应式计算可知,聚乙烯推进剂 S1 的最佳空燃比是 16.3,石蜡推进剂 S4 的最佳空燃比是 16.4,炭黑质量分数为 5% 的聚乙烯固体推进剂 S5 最佳空燃比为 29.0。由表中计算结果分析知,Case 6 未能自持燃烧,Case 4 空燃比低于最佳空燃比,说明石蜡推进剂为贫氧燃烧状态,其他工况的空燃比均大于最佳空燃比,表明推进剂为富氧燃烧状态。

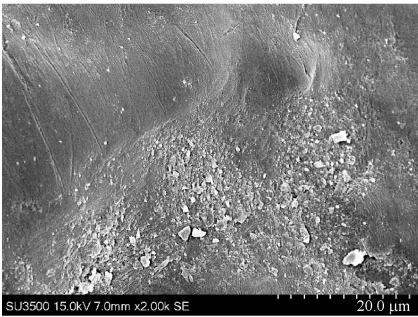
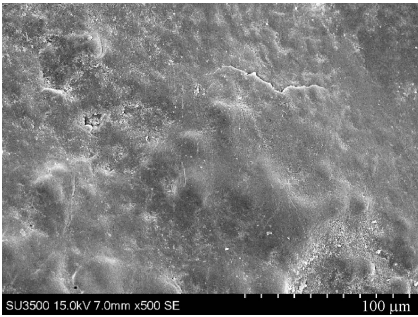
Case 6 无法自持燃烧,是因为添加了碳纤维。为了确定碳纤维为影响因素,又在其基础上添加了质量分数为 50% 的石蜡做实验,结果与 Case 6 一致,无法自持燃烧,说明碳纤维为唯一影响因素。

为了探究碳纤维阻碍固体推进剂自持燃烧原因,对燃烧后的推进剂内表面进行了扫描电镜分析。图 5 为不同组分固体推进剂燃烧过后附着区表面形貌扫描电镜图。由图 5(a) 可以看出,HDPE 固体燃料附着区表面平坦光滑,继续放大可见少量形态各异的颗粒,应是 HDPE 燃烧后形成的炭灰颗粒。图 5(b) 为添加碳纤维的 HDPE 固体推进剂烧蚀剖面图,图中白色箭头代表气流方向。结合图中标识可以看出图中 HDPE 包裹

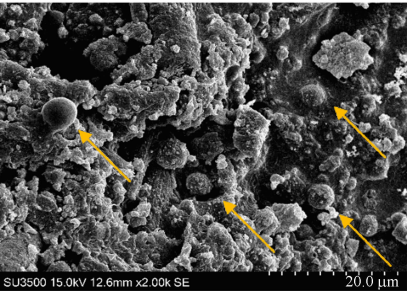
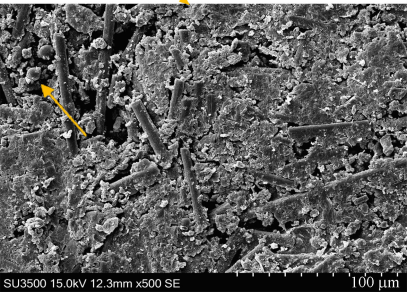
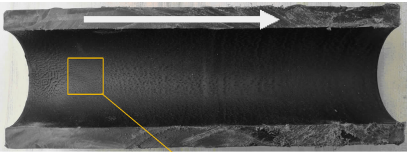
表 3 SFRJ 燃烧性能
Table 3 Combustion performance of SFRJ

工况	燃料	$\Delta m/\text{kg}$	$\bar{r}/(\text{mm/s})$	f	$c^*/(\text{m/s})$	I_{sp}/s	$\eta/\%$
1	100HDPE	0.141	0.144	31.9	947	2008	94.2
2	30PW/HDPE	0.185	0.198	24.0	950	1657	86.9
3	50PW/HDPE	0.204	0.218	22.3	952	1258	84.9
4	100PW	0.476	0.927	5.0	643	130	71.3
5	5CB/HDPE	0.202	0.161	29.7	1107	1679	83.4
6	5CF/HDPE	0.018					

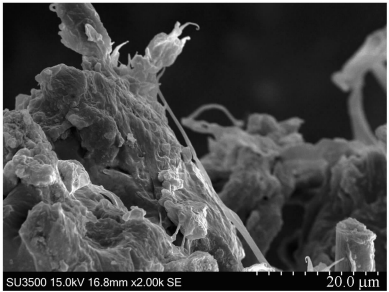
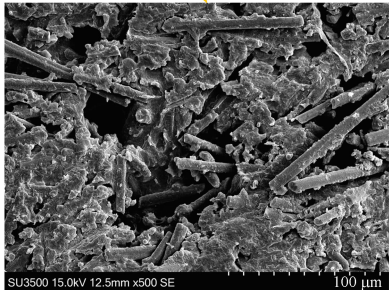
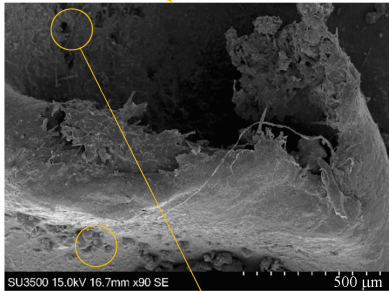
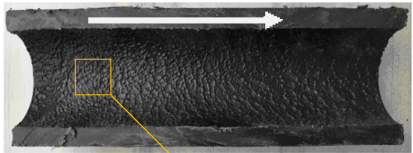
着杆状碳纤维并伴有少量球状颗粒(箭头标识),继续放大球状颗粒清晰可辨,对比图 5(a)可推断该球状颗粒类似于粉煤灰^[18],为碳纤维燃烧后产生。图 5(c)展示了在碳纤维基础上添加石蜡的 HDPE 固体推进剂烧蚀剖面图。结合图中标识可以看出高温高速来流将表面吹起,但碳纤维“拉住”了将要脱落的小块,宏观上小块连成一片形成鳞片状“水波纹”,微观上每一个鳞片状小块边缘



(a) HDPE



(b) 5CF/HDPE



(c) 5CF/50PW/HDPE

图 5 不同组分固体推进剂附着区表面形貌照片
Fig. 5 Surface morphology photo of solid propellant reattachment zone under different components

上面可以看到裸露的碳纤维和拉丝的部分,拉丝部分 2000 倍率下与图 5(b)中 2000 倍率下明显不同,说明拉丝为石蜡。在鳞片状小块迎风面(图中下方圆圈)可以发现残留的灰尘,背风面(图中上方圆圈)可以发现表面 HDPE 和石蜡烧掉后纤维层下面留下的空隙,与图 5(b)的 500 倍率下形态相似。

固体推进剂自持燃烧主要包括固体燃料的热分解和分解气体气相化学反应两个过程。而向聚乙烯推进剂中加入碳纤维确实阻碍了强迫对流下推进剂燃烧表面的机械剥蚀,导致固体推进剂热分解过程不能持续进行,这是碳纤维阻碍固体推进剂自持燃烧的主要原因。

分析平均燃速,由表 3 可以发现一方面添加炭黑的 Case 5 比 Case 1 提升 11.8%,另一方面

则均低于添加石蜡的 Case 2、Case 3。说明在推进剂中添加炭黑和石蜡均能提升燃速,但两种物质提升燃速的机理不同。炭黑一方面改善了推进剂辐射吸热系数,提高了火焰对燃烧表面的热反馈强度,增强燃烧稳定性,另一方面在剧烈燃烧过程中表面炭黑颗粒容易脱离聚乙烯基体,从而提升燃速。石蜡为非晶体,受热最先液化,然后汽化,汽化后才燃烧,在强迫对流条件下最先液化的石蜡液滴会被高速气流吹走,导致燃速升高。

3.2 推进剂中石蜡质量分数对燃烧性能的影响

3.2.1 燃烧现象分析

由高速摄像机拍摄的 Case 1~Case 4 发动机

工作时喷管出口不同时刻 t 的尾焰形态,如图 6 所示。 $t=1\text{ s}$ 时点火器开始工作,所看到的尾焰为点火器双基药与来流空气混合燃烧的效果,可以看到纯聚乙烯的 Case 1 尾焰明亮,Case 2、Case 3 呈黄绿色,纯石蜡的 Case 4 则黑烟较多; $t=3\text{ s}$ 时点火器工作刚结束,发动机内流场逐渐趋于稳定,固体推进剂经吸热已开始分解、燃烧,尾焰拉长变粗变亮,马赫盘清晰可见; $t=6\text{ s}$ 时,推进剂完全自持燃烧,所有工况尾焰都明显缩短变细变暗。由图 6 可知,100HDPE 的尾焰最为明亮,随着石蜡加入,尾焰变细变暗,而后石蜡质量分数升高,尾焰再变粗变亮,而 100PW 燃烧不完全,导致黑烟多,明焰少。

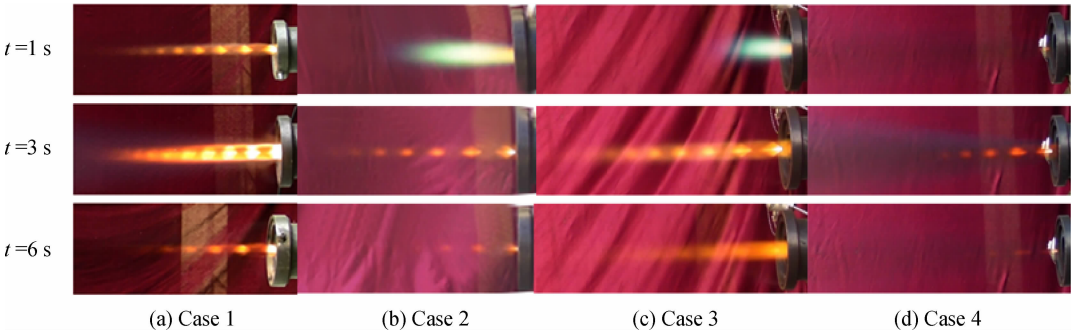


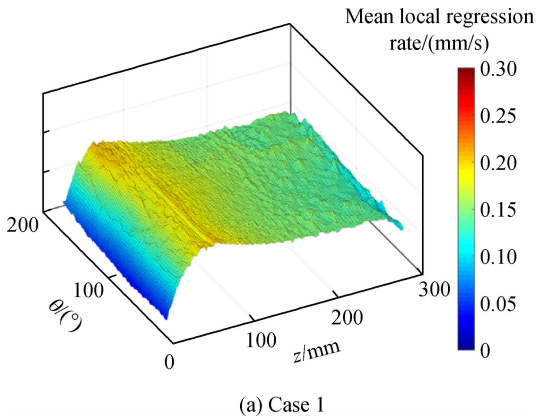
图 6 不同时刻发动机喷管尾焰形态
Fig. 6 Engine nozzle tail flame morphology at different times

3.2.2 燃速分析

通过数据重构获得了 Case 1~Case 4 的当地平均燃速三维分布, θ 表示推进剂内壁面周向角度, z 代表推进剂轴向位置,如图 7。可以明显观察到推进剂中石蜡质量分数越高,燃速越高;当地燃速分布形貌显示波纹状凸起向波浪状凸起转变。分析现象原因,石蜡为非晶体,受热最先液化,在其内部布朗运动加剧,存储热量,温度升高,发生汽化,石蜡汽化后形成石蜡蒸汽才能燃烧完全。发动机工作过程中,在强迫对流条件下最先液化的石蜡液滴会被高速气流的剪切作用吹走,导致燃速升高^[19];同时,石蜡能够沿着燃烧表面形成低黏度、低表面张力的液体层,由于高速气流存在,液体层变得不稳定,会出现开尔文-亥姆霍兹不稳定性现象^[20],且随石蜡占比升高波纹状凸起向波浪状凸起转变。

图 8 提供了 Case 1~Case 4 平均燃速轴向分布,4 种工况平均燃速沿轴向都呈现类马鞍形。首先,发动机稳定工作时固体推进剂前部建立起了回流区,在回流区与来流空气的剪切面上,来流

空气与回流区的富燃气体发生化学反应,放热使该区域温度升高,同时在推进剂燃烧表面与回流接触面上存在切向力,促使推进剂加速分解,因此燃速沿轴向方向迅速升高,并在附着点附近达到最大值。然后,在再发展区,流场相对稳定下来,来流空气与分解燃气发生扩散燃烧,燃速缓慢下降。最后,在固体推进剂末端,因燃烧室和补燃室之间掺混板的作用,对流场内的流动和传热造成了一定影响,燃速下降,燃速轴向分布就形成了类



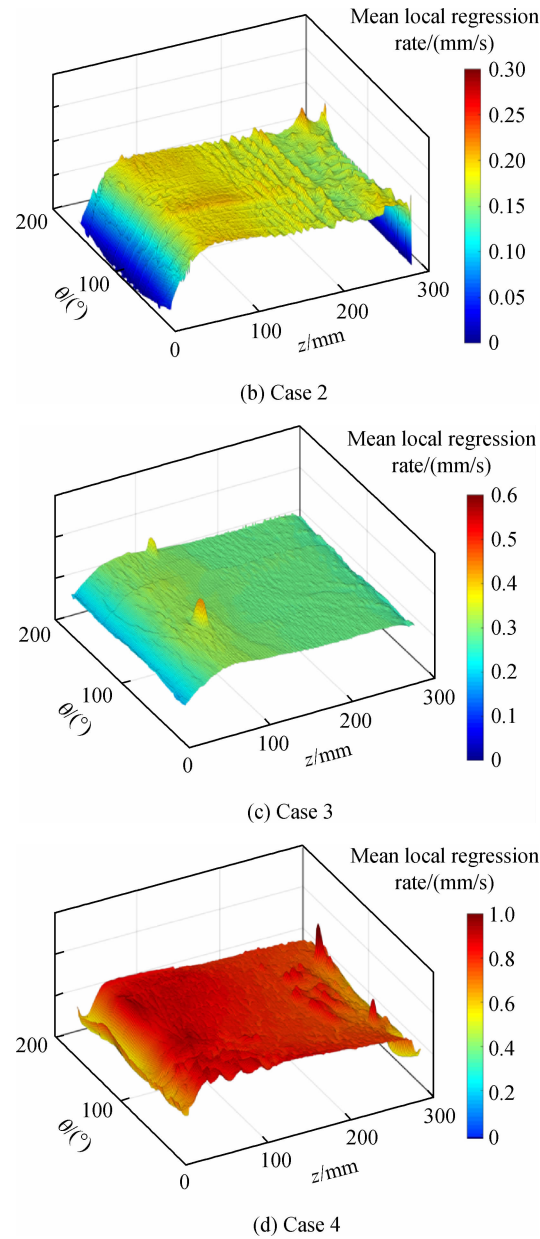


图 7 当地平均燃速三维分布

Fig. 7 Three-dimensional distribution of mean local regression rate

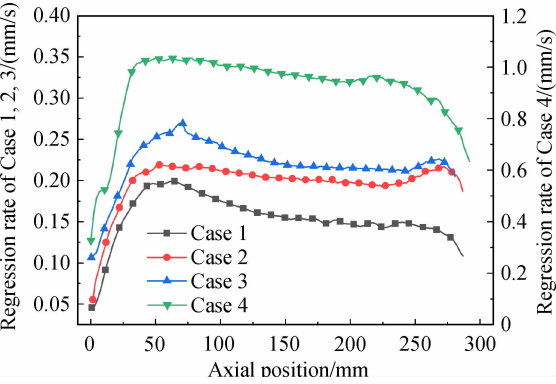


图 8 平均燃速轴向分布

Fig. 8 Axial distribution of mean regression rate

马鞍形状。很显然,Case 4 最高燃速在 1 mm/s 之上,远大于其他 3 种工况的最高燃速。同时可以看出随着石蜡质量分数的升高,最高燃速显著提升,最高燃速的提升造成了平均燃速的升高,对应表 3 中 Case 1~Case 4 的平均燃速规律。Case 2、Case 3、Case 4 比 Case 1 的平均燃速分别提高了 37.5%、51.4%和 544%。

为了进一步定量分析推进剂中石蜡质量分数对平均燃速的影响规律,通过计算拟合得到了它们之间的经验曲线。通过观察平均燃速趋势,决定采用非线性拟合方法对实验结果进行拟合,如图 9 所示。由图可知,平均燃速与推进剂中石蜡质量分数呈指数递增关系。

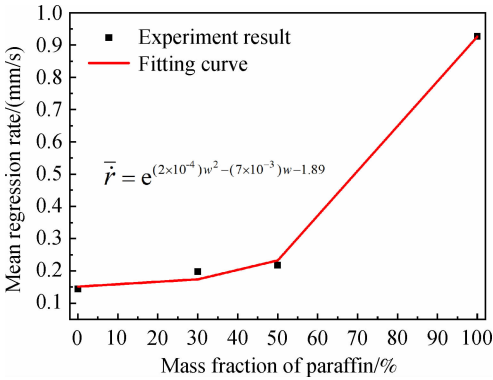


图 9 推进剂中石蜡质量分数与平均燃速拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of mass fraction of paraffin and mean regression rate in propellant

3. 2. 3 SFRJ 工作性能分析

图 10 为不同石蜡质量分数即 Case 1~Case 4 的补燃室压强及温度数据曲线。Case 1~Case 3 发动机工作时间为 20 s,Case 4 发动机工作时间为 8 s。

由图 10(a)可以看出 4 种工况下补燃室压强变化趋势基本相同,在 5 s 时,点火器点火,压强迅速上升至 0.7 MPa 左右,出现点火压强峰。点火器工作结束后,压强迅速下降,随后发动机工作流场稳定,压强缓慢上升并趋于稳定,燃烧室压强不随时间变化,可视为等面燃烧。对于 Case 1~Case 3,稳定后的压强约为 0.65 MPa,Case 4 稳定后的压强约为 0.35 MPa,通入氮气使发动机工作结束,压强迅速下降。对比 Case 1~Case 3 发现对于聚乙烯基的固体推进剂,石蜡质量分数对补燃室压强没有明显的影响,但是对于 Case 4 中 100%石蜡的固体推进剂,其补燃室压力很低。

由图 10(b)可以看出,4 种工况补燃室温度曲

线变化规律相似,在 5 s 时,点火器工作,温度迅速上升,在 10 s 时,发动机流场达到稳定,固体推进剂扩散燃烧,温度继续上升,但比点火器工作阶段上升趋势变缓,通入氮气使发动机工作结束,温度迅速下降。Case 1 温度峰值约为 1500 K,Case 2 温度峰值约为 1450 K,Case 3 温度峰值约为 1250 K,对于工况 Case 4,温度峰值只有 800 K,说明随着石蜡质量分数的升高,温度平均值降低,也可以说明石蜡燃烧不充分,燃烧效率较低。补燃室内压力稳定较快而温度稳定较慢,因此温度数据仅用于定性分析。

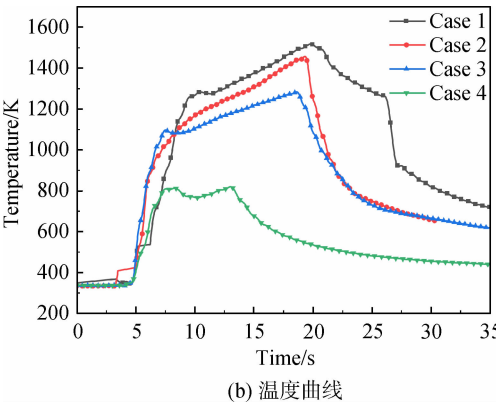
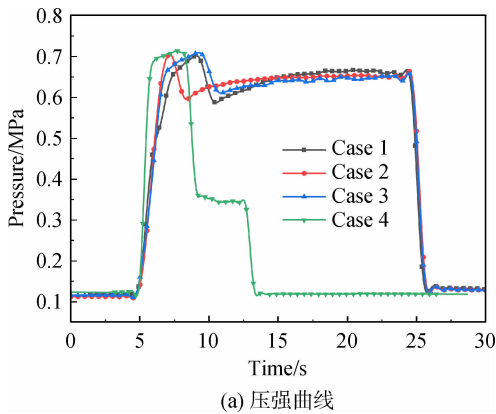


图 10 不同石蜡质量分数下补燃室压强及温度曲线
Fig. 10 Pressure and temperature curves of afterburning chamber with different mass fractions of paraffin

图 11 为不同石蜡质量分数下空燃当量比与燃烧效率数据曲线。可以看出空然当量比与燃烧效率相关,当石蜡质量分数小于 50%时空然当量比都大于 1.0,说明可燃混合气中所含实际空气量超过所必需的理论空气量,此时推进剂为富氧燃烧。当石蜡质量分数为 100%时空燃当量比急剧下降到 0.3,此时为贫氧燃烧。由于在燃烧过程中燃料表面存在不稳定的熔化层,受气流剪切作用,石蜡液滴被夹带到气流中,未来得及汽化便

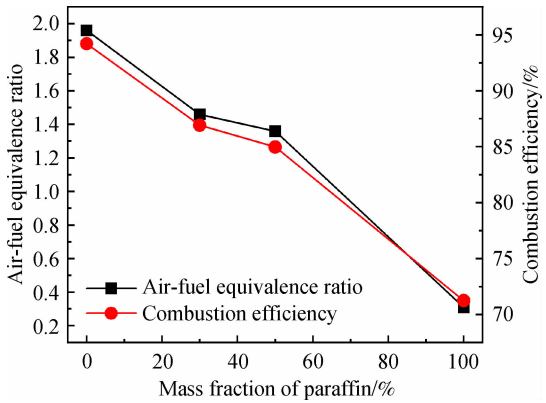


图 11 不同石蜡质量分数下空燃当量比与燃烧效率曲线
Fig. 11 Curves of air-fuel equivalent ratio and combustion efficiency at different mass fractions of paraffin

被气流吹出燃烧室,燃烧不完全,其燃烧效率仅为 71.3%。

图 12 是 Case 1~Case 4 工况下发动机推力变化曲线。曲线变化趋势与压力变化非常相似,在点火器工作阶段,推力迅速上升形成点火推力峰,在点火器工作结束后,推力迅速下降,随后推力逐渐上升并趋于稳定,在发动机工作结束后,推力迅速下降。对比 4 种工况的推力曲线可知,随着石蜡质量分数的增加,发动机产生的推力越来越小,发动机比冲也逐渐降低,这是石蜡燃烧不完全导致的。

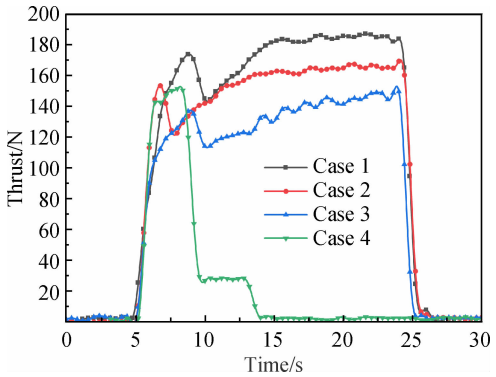


图 12 不同石蜡质量分数下发动机推力曲线
Fig. 12 Thrust curve of engine with different mass fractions of paraffin

石蜡相对分子质量大,完全燃烧需氧量大,而液化的石蜡在补燃室中未完全燃烧就被气流吹出喷管,这是石蜡质量分数越高燃速越高,而空燃比、燃烧效率、推力与比冲下降的主要原因。下一步将研究提高石蜡在固体燃料冲压发动机中燃烧效率的方法,如增加进气量、添加氧化剂、引入旋流^[21]、改变推进剂结构^[22]等。

4 结 论

本文通过实验与数据分析相结合的方法,研究了推进剂组分对固体燃料冲压发动机性能影响,主要发现与结论如下:

- 1) 加入 5% 的碳纤维阻碍了强迫对流下聚乙烯推进剂燃烧表面的机械剥蚀,导致其热分解过程不能持续进行,无法自持燃烧。
- 2) 随石蜡质量分数升高,聚乙烯基推进剂当地燃速分布形貌显示波纹状凸起向波浪状凸起转变,出现了开尔文-亥姆霍兹不稳定现象。
- 3) 在推进剂中添加炭黑和石蜡均能够较大程度的提高燃速。石蜡质量分数为 30%、50% 以及纯石蜡的推进剂比聚乙烯分别提高了 37.5%、51.4% 和 544%。拟合得到了聚乙烯推进剂平均燃速与石蜡质量分数呈指数递增关系。
- 4) 石蜡燃烧不完全会导致发动机空燃比、燃烧效率、推力与比冲的降低。

参考文献:

[1] KRISHNAN S,PHILMON G. Solid fuel ramjet combustor design[J]. Progress in Aerospace Sciences,1998,34(3): 219-256.

[2] GOBBO-FERREIRA J,SILVA M G,CARVALHO J A. Performance of an experimental polyethylene solid fuel ramjet[J]. Acta Astronautica,1999,45(1):11-18.

[3] 成红刚,陈雄,朱国强,等. PE 在固体燃料冲压发动机中的燃烧特性实验研究[J]. 固体火箭技术,2014,37(2):204-208.

CHENG Honggang,CHEN Xiong,ZHU Guoqiang,et al. Experimental investigation on combustion characteristic of PE in solid fuel ramjet[J]. Journal of Solid Rocket Technology,2014,37(2):204-208. (in Chinese)

[4] 陈雄,成红刚,周长省,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 Honggang,ZHOU Changsheng,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. (in Chinese)

[5] VANDERGELD C W M,KORTING P A O G,WIJCHERS T. Combustion of PMMA,PE,and PS in a ramjet[J]. Combustion and Flame,1990,79(3):299-306.

[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 Yue,XU Zhiwei,CHEN Suhang,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. (in Chinese)

[7] 唐乐,陈苏杭,许志伟,等. 石蜡燃料的燃烧性能与其化学

组成的关系[J]. 含能材料,2017,25(8):633-638.

TANG Yue,CHEN Suhang,XU Zhiwei,et al. Relationship between combustion characteristics and chemical components of paraffin fuel[J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2017,25(8):633-638. (in Chinese)

[8] KARABEYOGLU A,ZILLIAC G,CASTELLUCCI P,et al. Flight demonstration of the high burning rate hydrocarbon-based hybrid rocket fuels[R]. Huntsville,Alabama: the 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit,2003.

[9] MAZZETTI A,MEROTTO L,PINARELLO G. Paraffin-based hybrid rocket engines applications: a review and a market perspective[J]. Acta Astronautica,2016,126:286-297.

[10] AKHTER M Z,HASSAN M. A. Characterisation of paraffin-based hybrid rocket fuels loaded with nano-additives[J]. Journal of Experimental Nanoscience,2018,13(Suppl. 1):31-44.

[11] CHRISTIAN S,MARIO K,KONSTANTIN T,et al. Low cost small-satellite access to space using hybrid rocket propulsion[J]. Acta Astronautica,2019,159:578-583.

[12] 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.

[13] 杨海涛. 旋流对含炭黑固体燃料冲压发动机燃烧性能的影响[D]. 南京:南京理工大学,2018.

YANG Haitao. The effects of swirl flow on combustion performance of solid fuel ramjet with carbon black additive solid fuel[D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology,2018. (in Chinese)

[14] 李唯喧,吕庆山,陈雄,等. 旋流对固体燃料冲压发动机燃烧过程的影响[J]. 航空动力学报,2017,32(5):1250-1258.

LI Weixuan,LÜ Qingshan,CHEN Xiong,et al. Effect of swirl flows in combustion of solid fuel ramjet[J]. Journal of Aerospace Power,2017,32(5):1250-1258. (in Chinese)

[15] SCHULTE G,PEIN R,HOEGL A. Temperature and concentration measurements in a solid fuel ramjet combustion chamber[J]. Journal of Propulsion and Power,1987,3(2):114-120.

[16] 邱瑛,李映坤,李唯喧,等. 基于高分辨率数据重构的固体燃料冲压发动机燃料平均燃速测试[J]. 航空动力学报,2019,34(11):2466-2477.

QIU Shuang,LI Yingkun,LI Weixuan,et al. Measurement and analysis of fuel average regression rate of solid fuel ramjet based on high-resolution data reconstruction[J]. Journal of Aerospace Power,2019,34(11):2466-2477. (in Chinese)

[17] 李唯喧,杨海涛,陈雄,等. 旋流与炭黑对聚乙烯固体燃料冲压发动机工作性能的影响[EB/OL]. [2020-02-22]. <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.190340>.

[18] 王东星,王宏伟,王瑞红. 活性 MgO-粉煤灰固化淤泥微观

机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 2): 3717-3725.

WANG Dongxing, WANG Hongwei, WANG Ruihong. Macro-mechanisms of dredged sludge solidified with reactive MgO-fly ash[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Suppl. 2): 3717-3725. (in Chinese)

[19] KIM S, MOON H, KIM J, et al. Evaluation of paraffin-polyethylene blends as novel solid fuel for hybrid rockets[J]. Journal of Propulsion and Power, 2015, 31(6): 1-11.

[20] ANNA P, MARIO K, STEFAN S. Understanding Kelvin-Helmholtz instability in paraffin-based hybrid rocket fuels [J]. Experiments in Fluids, 2018, 59(4): 1-16.

[21] MUSA O, XIONG C, CHANGSHENG Z, et al. Experimental and numerical investigation on the ignition and combustion stability in solid fuel ramjet with swirling flow [J]. Acta Astronautica, 2017, 137: 157-167.

[22] ZEZHONG W, XIN L, FEI L, et al. Combustion performance of a novel hybrid rocket fuel grain with a nested helical structure[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 97: 105613. 1-105613. 8.

(编辑:王碧琚)