

碳黑对固体燃料冲压发动机旋流燃烧特性影响

汤长俊¹, 陈国光¹, 陈 雄², 李唯暄²

(1. 中北大学 机电工程学院, 太原 030051;

2. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘 要: 为研究含碳黑推进剂对固体燃料冲压发动机(SFRJ)旋流燃烧特性的影响,以高密度聚乙烯和含碳黑聚乙烯为推进剂,使用直连式实验系统对冲压发动机进行了旋流和无旋工况的实验研究。并根据实验所获的数据进一步计算得到不同工况下 SFRJ 工作性能参数。结果表明与聚乙烯(PE)固体燃料相比,含 5% 碳黑的聚乙烯推进剂可以有效提高固体燃料的燃速、特征速度和推力。在旋流工况下,固体燃料冲压发动机补燃室压强和温度也相应提高,燃烧稳定性增强。同时,在对燃烧室构型进行实验研究时发现,固体燃料冲压发动机的燃烧稳定性和燃烧效率会随药柱内径的增大而提高,而发动机平均燃速则会随着药柱内径的增加而降低。

关 键 词: 固体燃料冲压发动机; 燃烧特性; 碳黑; 旋流强度; 火焰稳定

中图分类号: V435.1; V235.21

文献标志码: A

Influence of combustion performance of swirl on solid fuel ramjet about carbon black

TANG Changjun¹, CHEN Guoguang¹, CHEN Xiong², LI Weixuan²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering,

North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Mechanical and Engineering,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to study the influence of swirl flow and carbon black added propellant on the combustion performance of solid fuel ramjet, pure polyethylene and carbon black added polyethylene were used as solid fuel, and experiments with combustion were conducted in both swirl-flow and non-swirl-flow of different port diameters of fuel grain. And the working performance parameters were calculated based on the parameters obtained from experiment. The results indicated that compared with pure polyethylene (PE), the addition of 5% carbon black could increase the regression rate, characteristic velocity and thrust. In the working conditions of swirl-flow, the temperature and pressure of afterburning chamber were higher than those of non-swirl-flow, besides, the stability of combustion was also enhanced. Meanwhile, the increase of port diameter of fuel grain enhanced the combustion stability and efficiency of SFRJ, but decreased the regression rate.

收稿日期: 2019-11-23

作者简介: 汤长俊(1982—),男,博士生,主要从事固体火箭发动机方面研究。

引用格式: 汤长俊,陈国光,陈雄,等. 碳黑对固体燃料冲压发动机旋流燃烧特性影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(7): 1532-1540.
TANG Changjun, CHEN Guoguang, CHEN Xiong, et al. Influence of combustion performance of swirl on solid fuel ramjet about carbon black[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(7): 1532-1540.

Key words: solid fuel ramjet; combustion characteristic; carbon black; swirl strength; flame stability

冲压发动机因其安全性高、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。自 20 世纪 60 年代开始,法国工程师雷内·劳伦首先提出了“冲压”的概念。此后,大量学者便开始了针对冲压发动机工作性能的研究,并且在 20 世纪 80 年代之后逐步将研究重点集中于如何在最大程度上提高冲压发动机工作性能上。

当前,广泛应用于固体燃料冲压发动机(SFRJ)的推进剂主要有聚乙烯(PE)、端羟基聚丁二烯(HTPB)等碳氢类固体燃料推进剂。在冲压发动机工作过程中,药柱燃速和冲压发动机工作性能受发动机结构,飞行马赫数、空燃比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燃烧特性和工作性能进行研究,对于揭示其燃烧影响规律有重要意义。可在一定程度上对冲压发动机设计优化提供理论参考。从 20 世纪 60 年代至今,已经有诸多国内外专家对 SFRJ 的点火性能进行了大量的研究工作^[1-2]。Nabity 和 Walls^[3]研究了不同进气结构的 SFRJ 工作特性。结果表明,旁路进气冲压发动机燃烧特性受燃烧室几何尺寸影响不明显。Netzer 等^[4]对使用聚甲基丙烯酸甲脂(PMMA)、PE 和聚丁二烯/聚苯乙烯(PB/PS)为推进剂的 SFRJ 燃烧稳定性进行了实验研究。结果表明,来流温度对火焰稳定性成正比。Schulte^[5]对以 PE 和 HTPB 为固体燃料的冲压发动机在不同来流空气总温(673、473 K 和 288 K)下的燃烧稳定性进行了实验研究。得出结论与 Netzer 基本一致。Wooldridge 等^[6]研究了燃烧室突扩台阶高度对火焰稳定性的影响。结果表明,点火时台阶高度对火焰稳定影响较为关键,而在稳定燃烧建立以后,其受台阶高度影响则会相对弱化。

综合上述研究可知,碳氢燃料燃烧机里较为复杂,且燃速通常低于 1 mm/s ^[7]。根据 Metochianakis 等^[8]对冲压发动机推进剂燃烧影响规律的研究可知,推进剂表面传热特性是影响药柱燃烧特性的重要因素。为改善药柱表面传热状况,诸多学者选择向推进剂中添加镁、铝、硼等含能颗粒。而根据文献^[9]所述,引入旋流可有效提升推进剂燃速,提高发动机燃烧效率。为此,诸多学者对引入旋流以及添加含能颗粒等燃速增强方法进行了探索。

文献^[10]对在环境压强低于 3 MPa 时的 Al-Mg 贫氧推进剂燃烧特性进行了实验研究,明确了其燃烧特性以及相关影响因素。王云霞等^[11]对含硼颗粒贫氧推进剂在固体火箭冲压发动机补燃室燃烧产物的凝结特性进行了实验研究。结果表明,补燃室长度变化会导致燃烧产物粒径的变化。Pein 等^[12]研究了冲压发动机中含硼推进剂的燃烧效率的影响因素。结果表明,当来流气流具有一定切向速度时,推进剂中硼颗粒的燃烧效率有明显提升。Stowe 等^[13]针对固体燃料冲压发动机中的两相流动进行了数值模拟和实验研究,明确了发动机内部流场流动特性以及推进剂的燃烧特性。Dupays^[14]对固体火箭发动机不稳定燃烧现象进行了建模分析。结果表明,在推进剂中添加铝颗粒可有效改善发动机的燃烧稳定性。刘杰等^[15]针对旋流进气冲压发动机进行了三维建模,通过数值模拟的方法研究了发动机流场的燃烧情况。结果表明,旋流的引入对发动机燃烧效率的提高有积极作用。王鸿美等^[16]对 NEPE 在不同点热流密度下的点火性能进行了实验研究。该研究发现,热流密度对推进剂点火延迟影响敏感,热流密度越高,点火延迟越小。刘巍等^[17]对 SFRJ 旋流燃烧特性进行了实验研究。发现旋流的引入可使发动机工作稳定性有明显提高,且对发动机的燃速提升也存在着积极作用,但由于旋流会导致一定程度上的轴向动量损失,从而影响发动机的整体推力。文献^[18]通过数值模拟和实验方法研究了旋流强度对燃烧室燃烧稳定性和点火特性的影响。结果表明,燃烧稳定性会随着旋流的引入而增强。胡好生等^[19]使用不同偏心量的旋流器对冷态流场进行了实验研究。结果表明,偏心量为 0.5 mm 时,流场变化较小,当偏心量大于 0.5 mm 时流场变化较大。

冲压发动机工作性能在很大程度上依赖其推进剂的燃烧特性,而推进剂燃烧特性受发动机装药种类,燃烧室和补燃室结构,来流马赫数,空燃比等因素影响敏感。此外,旋流的引入可以在一定程度上提高推进剂的燃烧效率,是一种改善固体燃料冲压发动机工作性能的有效手段。因此,为研究冲压发动机燃速影响规律^[20],本文选用含碳黑聚乙烯推进剂,对其在不同燃烧室内径,不同来流旋流强度,不同碳黑质量分数等燃烧特性影响

因素进行了实验研究。

静温静压。

1 实验方法和实验方案

1.1 SFRJ 连管实验装置

实验装置主要包括直连式实验系统,实验发动机,NACA(美国国家航空咨询委员会)翼片式旋流器。此外,本文使用三维激光扫描仪对燃烧后推进剂药柱进行三维扫描,以获取其三维燃速云图和当地燃速变化曲线。直连式实验台如图 1 所示。

1.1.1 NACA 翼片式旋流器

为顺利进行本文实验,本文使用了原理简单、操作方便、旋流强度可调且成本合理 NACA 翼片式可调节旋流发生装置^[21]。

该 NACA 翼片旋流器与其他普通旋流器相比具有总压损失低、旋流效果强、旋流强度可调等优点。具体实物图如图 2 所示。

1.1.2 实验系统与实验发动机

本文所采用的直连式实验系统如图 3 所示,为更全面的研究发动机燃烧特性,本实验在燃烧室尾部设置了压力与温度传感器,以获得燃烧室

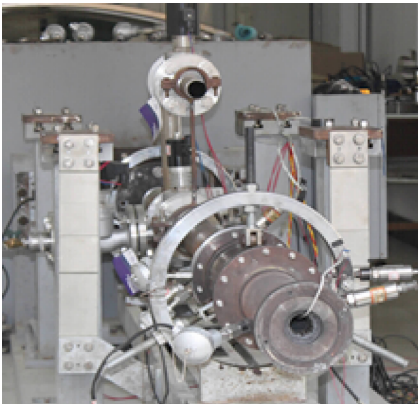


图 1 SFRJ 实验系统
Fig. 1 Experimental facility of SFRJ



图 2 旋流发生器实物图
Fig. 2 Practicality picture of swirler

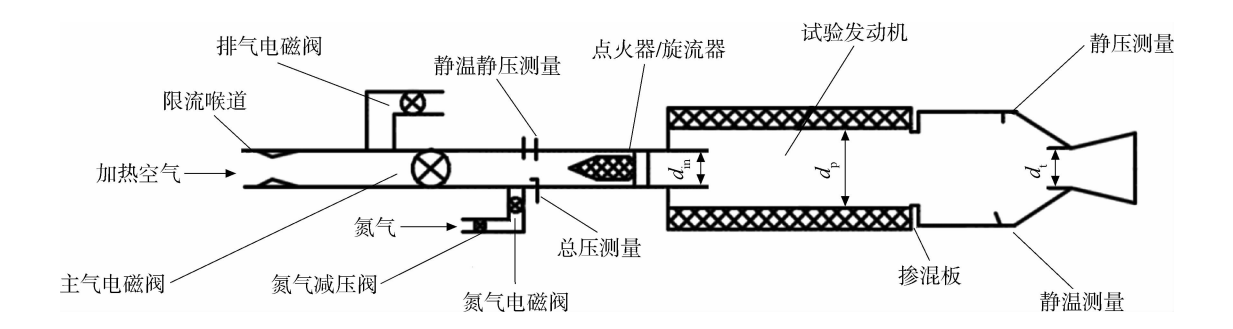


图 3 直连式实验系统
Fig. 3 Connected pipe facility

1.2 实验工况

本文为研究发动机燃烧室构型,旋流强度以及添加碳黑质量对发动机燃烧特性影响规律,利用直连式实验台对不同药柱内径,不同旋流强度以及添加碳黑推进剂等多个工况的 SFRJ 进行了点火实验,具体实验工况如表 1。

其中 PE 和 PE-C 分别代表聚乙烯和添加碳黑质量分数为 5% 的聚乙烯固体燃料,来流旋流强度由 s 表示, d_p 和 d_m 分别表示药柱内径与进气道内径,表示来流空气质量流率。实验中喷管喉道直径 $d_t = 28.2\text{ mm}$,固体燃料长度 $L_f = 280\text{ mm}$ 。

表 1 实验工况

Table 1 Experimental conditions

Case	固体燃料	s	d_p/mm	d_m/mm	$\dot{m}_{\text{air}}/(\text{kg/s})$
1	PE	0	70	40	0.3
2	PE	0.4	70	40	0.3
3	PE-C	0	70	40	0.3
4	PE-C	0.2	70	40	0.3
5	PE-C	0.4	70	40	0.3
6	PE-C	0.6	70	40	0.3
7	PE-C	0.4	60	40	0.3
8	PE-C	0.4	80	40	0.3
9	PE-C	0.4	90	40	0.3

直连式实验台主要模拟激波后来流状况,本实验来流总压为 0.78 MPa,总温为 504 K,以模拟海平面 2.0 马赫数的飞行工况。此外,来流空气流量靠限流喉道控制。

2 碳黑对固体燃料冲压发动机燃烧性能的影响

2.1 补燃室压强变化分析

由图 4(a)和图 4(b)所示,不同工况下的补燃室压强随时间变化趋势大致相同,但在不同工况下,点火压力峰值略有不同。由图 4 可知,点火器在 0 s 开始工作,压强曲线在 3 s 左右达到峰值;此时,点火器工作结束,补燃室压强略有下降,并在 3~5 s 时缓慢上升,此时药柱自持燃烧基本建立,压强逐渐趋于稳定。

点火峰值的形成主要是由于点火发动机和推进剂的共同作用。本实验为提供持续稳定点火热流,选用了装药燃速更高,能量更大的固体火箭点火发动机为点火器。在点火器工作时所产生的高温燃气作用下,会使来流入口质量流率和药柱表面温度升高,从而加快药柱热解,最终导致点火初期补燃室压强较高。在点火器工作结束后,由于入口质量流率和总温突降,使发动机的内流场发

剧烈变化,固体燃料燃面温度和热解速率迅速降低,并导致燃烧室压强也随之降低。随着药柱自持燃烧的建立,发动机内流场也逐渐稳定,燃烧室压强逐渐升高并最终趋于稳定。

图 4(a)表示 Case 1 和 Case 3 在无旋工况下的补燃室压强随时间变化曲线,由图 4(a)可知,相比于 Case 1 而言,Case 3 具有更高的工作压力,更短的建压时间,且在 5 s 时 Case 3 的压强曲线趋于平直,而 Case 1 压力依旧处于上升状态,说明 Case 3 可以更快达到稳定燃烧状态。图 4(b)表示 Case 2 和 Case 5 在旋流强度为 0.4 的工况下补燃室压强曲线,与上述情况类似,相比于 Case 2 而言,Case 5 可更快达到稳定状态。

在上述 4 种工况中,Case 1 和 Case 2 使用的是聚乙烯固体燃料,而 Case 3 和 Case 5 两工况均在聚乙烯中添加了质量分数为 5% 的碳黑,通过上述分析可知,在固体燃料中添加碳黑会在一定程度上增加药柱表面导热性能,从而使推进剂更快的建立自持燃烧。

2.2 补燃室温度变化分析

由补燃室温度变化曲线(图 5)可知,不同工况的温度变化趋势无明显差别,由图可知,在 0 s 时点火器开始工作,温度迅速升高,并在 6 s 时逐渐稳定。在温度达到稳定状态后,温度持续缓慢上升,直至 20 s 时工作结束。综合分析各工况温度曲线可知,温度均会随着碳颗粒的添加而上升,与入口来流状况无关。且在旋流工况下,温度上升幅度更大。综合上述分析可知,碳黑的添加会增强药柱表面传热,使药柱燃速升高,并在一定程度上提高燃烧效率;而旋流的引入会增加燃气在

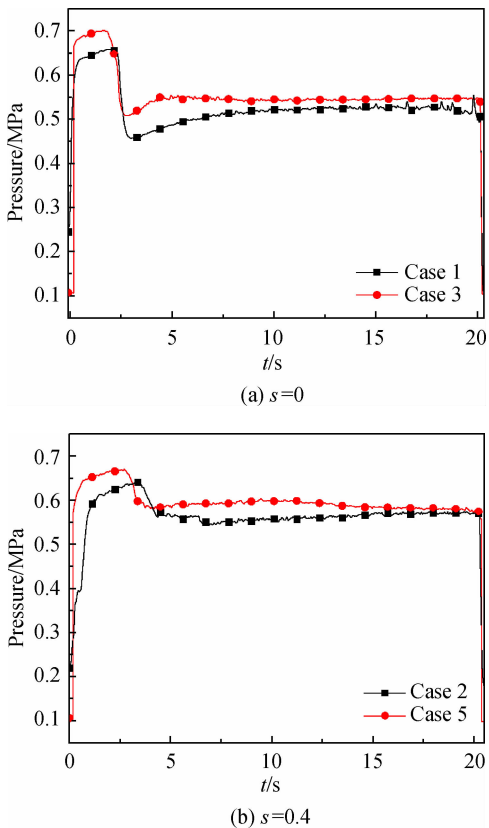


图 4 补燃室压强曲线

Fig. 4 Pressure profiles of after burning chamber

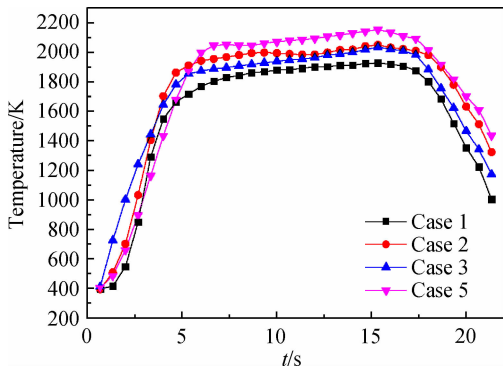


图 5 补燃室温度变化曲线

Fig. 5 Temperature profiles of after burning chamber

发动机燃烧室和补燃室内的停留时间,是燃烧更加充分,导致补燃室温度升高。

2.3 燃烧现象分析

如图 6(a)所示,发动机喷管出口火焰随时间推移呈现出不规律变化,在点火器工作期间(1~3 s)火焰明亮且稳定,在点火器停止工作时(3 s)火焰形短而细,说明此时发动机正在建立自持燃烧。在发动机稳定工作过程中,火焰的长度和粗细以及马赫盘的亮度会随发动机工作时间推移发生变化。而添加碳黑的聚乙烯推进剂发动机火焰形态(图 6(b))则与图 6(a)差距明显,火焰形态只在点火器停止工作时(3 s)出现了短暂的小幅变化,其余时间火焰形态稳定,且马赫盘清晰明亮,表明此阶段发动机内温度较高,与图 5 所示一致,表明碳黑的添加有助于提高发动机内部温度。结合上述分析认为碳黑的添加有助于提高发动机的燃烧稳定性。

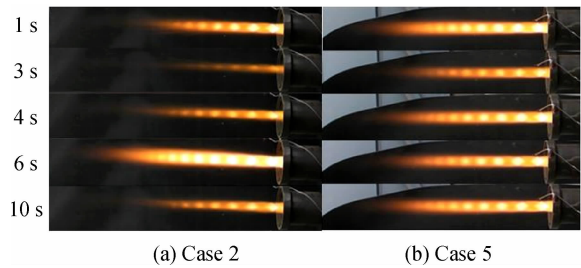


图 6 SFRJ 不同时刻尾焰形态

Fig. 6 Flame shape of SFRJ in different time

2.4 燃速分析

发动机药柱燃速云图与当地燃速沿药柱表面分布曲线如图 7 所示^[22]。发动机内部流场示意图如图 8 所示。结合图 7 与图 8 分析可知,药柱燃速均在回流区内迅速升高,并在附着点达到最大值,随后在再发展区逐渐减小并达到稳定。

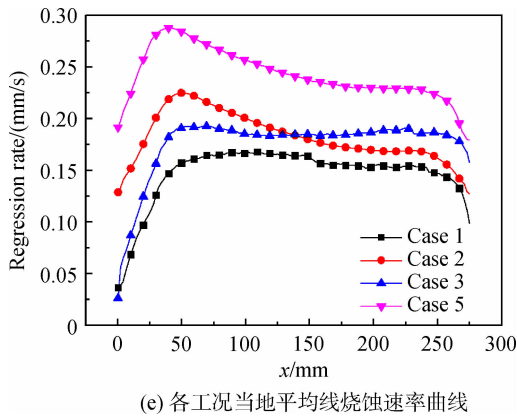
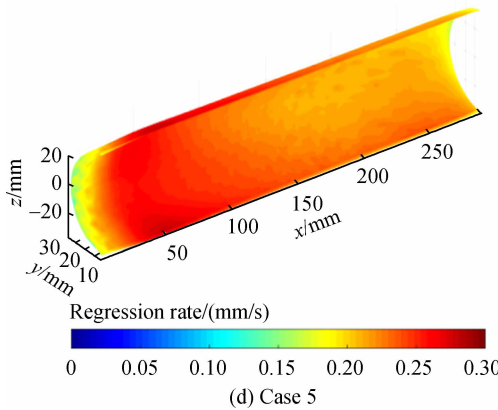
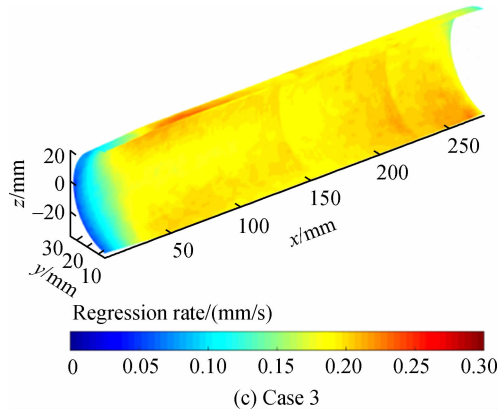
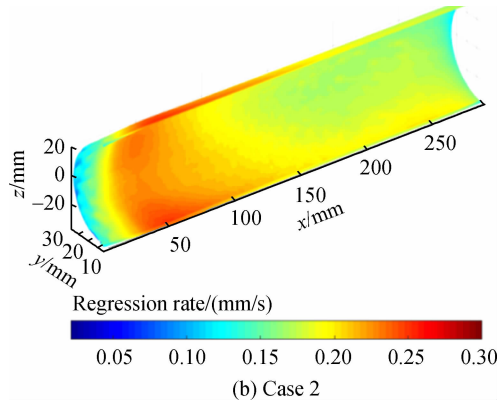
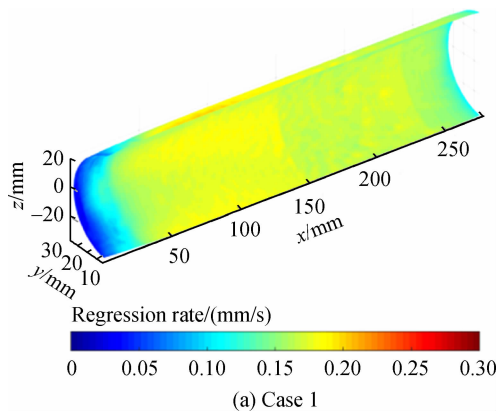


图 7 固体燃料当地平均线烧蚀速率云图和曲线
Fig. 7 Contours and curves of average local ablation velocity of solid fuel

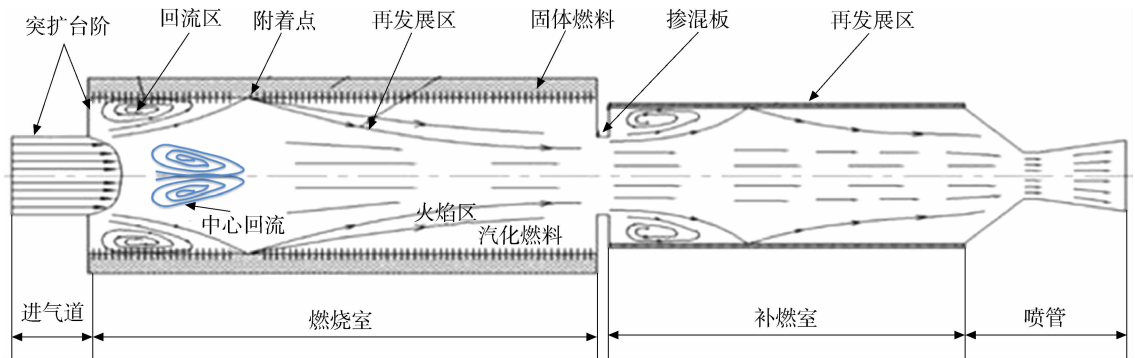


图 8 SFRJ 工作过程流动和燃烧过程示意图

Fig.8 Working process of solid fuel ramjet

图 7(a)为无旋工况下聚乙烯推进剂燃速云图,图 7(c)为无旋工况下添加碳黑聚乙烯燃速云图分布。对比两者燃速云图可知,两工况下推进剂燃速整体趋势一致,但含碳黑推进剂的燃速明显高于聚乙烯推进剂。分析旋流工况下燃速云图可知(图 7(b)和图 7(d))含碳黑推进剂燃速增加幅度明显大于无旋工况。

由图 7 可知,燃速云图存在明显的不对称现象。其中,旋流工况下燃速云图不对称性比无旋工况下更为明显。造成这种现象的原因可由图 8 说明,图 8 所示为固体燃料冲压发动机工作原理简图,中心涡流曲线为旋流工况下所产生的中心回流(无旋工况下不存在中心回流)。与自由射流实验系统不同,直连式实验系统来流不稳定性是广泛存在的,这种不稳定性主要由实验加温系统所导致,本实验加温系统使用航空煤油作为燃料加热来流空气,所以在无旋工况下,难免会出现流动与燃烧的不稳定现象,此种不稳定现象会间接导致药柱内表面烧蚀量的不均匀现象,进而导致燃速的不均匀(即非对称现象)。同理,在旋流工况下,由于旋流会产生离心力,且在燃烧室入口处由于流场扩张结构和离心力的共同作用下会产生中心回流,中心回流的和后台阶回流的共同作用会使来流空气与热解产物的充分掺混,增加

回流区处的烧蚀量,同时结合来流的不稳定性,使本来存在的不均匀性更加明显。

2.5 SFRJ 工作性能分析

根据化学反应方程式计算了聚乙烯和含碳黑聚乙烯燃料的最佳空燃比分别为 16.3 和 16.0。为评估发动机具体工作性能,根据实验所获得的发动机相关参数对 SFRJ 工作性能参数进行了计算,计算结果见表 2。其中, Δm_f 表示药柱烧蚀质量, $\dot{r}$ 表示药柱平均燃速, A/F 表示空燃比, C^* 表示特征速度, F 代表发动机推力。具体计算公式如下:

$$C^* = \frac{p_0 A_t}{\dot{m}_e} \tag{1}$$

$$\dot{m}_f = \frac{\Delta m_f}{t_c} \tag{2}$$

$$F = \dot{m}_e v_e - \dot{m}_a v_a = \dot{m}_e C^* c_f - \dot{m}_a v_a \tag{3}$$

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}_f} \tag{4}$$

其中 p_0 表示发动机补燃室压强, A_t 代表喷管喉道面积, $\dot{m}_f$ 表示燃气质量流率, $\dot{m}_a$ 表示来流空气质量流率, c_f 表示发动机推力系数,取值 $c_f = 1.08$, I_{sp} 代表比冲。

由表 2 可知,4 组工况的空燃比均大于最佳空燃比,表示上述工况化学反应均在富氧环境下

表 2 SFRJ 工作性能参数

Table 2 Working performance parameters of SFRJ

Case	固体燃料	s	$\Delta m_f/\text{kg}$	$\dot{r}/(\text{mm/s})$	A/F	$C^*/(\text{m/s})$	F/N
1	PE	0	0.173	0.1398	34.682	1063.783	149.9573
2	PE	0.4	0.199	0.1606	30.151	1100.011	163.4414
3	PE-C	0	0.202	0.1607	29.703	1107.108	166.1388
5	PE-C	0.4	0.290	0.2265	20.690	1192.848	199.8485

发生。通过其平均燃速可知,在无旋工况下,碳黑的添加可是燃速提高 14.9%;在旋流工况下,添加碳黑可使燃速提升 29.1%。说明在旋流工况下,碳黑添加对燃速的影响更为敏感。同时,再无旋和旋流工况下,碳黑的添加可使特征速度分别提升 4.1%和 8.4%,使推力分别提升 10.8%和 22.3%。

3 旋流强度对含碳黑固体燃料冲压发动机燃烧性能的影响

图 9 为不同旋流强度下补燃室压强曲线。结合上文分析可知,压力在点火器工作时达到峰值,并在点火器结束工作后逐渐稳定。且在发动机稳定工作之后压强随旋流强度的增加而增加,说明旋流的引入可以提升推进剂热解产物的燃烧效率。

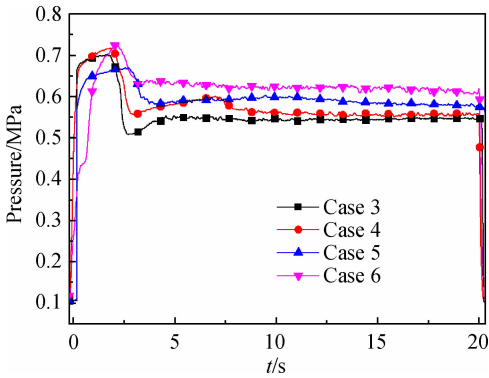


图 9 不同旋流强度补燃室压强曲线
Fig. 9 Pressure profile of different swirl intensities

图 10 所示为不同旋流强度当地燃速分布。由图可知,各工况当地燃速均在附着区达到最大值,并在再发展区逐渐减小并趋于稳定,且整体燃速随旋流强度的增加而增加。值得注意的是,附着点位置随旋流强度的增加而逐渐向燃烧室入口

方向移动,且当地燃速均在燃烧室末端出现明显升高的现象。造成这些现象的原因主要由于旋流产生的离心力会将燃烧产物逐渐推向壁面,且在切向速度的作用下使之与来流空气更充分地掺混,从而导致燃速升高。由于旋流强度增加,导致轴向动量损失逐渐加大,由于发动机燃烧室存在突扩台阶,导致附着点位置逐渐向燃烧室入口处移动。虽然旋流强度会在燃烧室末端有所衰减,但考虑其离心力作用会使燃烧室末端颗粒向要住表面附着,且由于燃烧室末端有掺混版存在,由于流通面积骤然减小,进而导致药柱末端出现侵蚀现象。

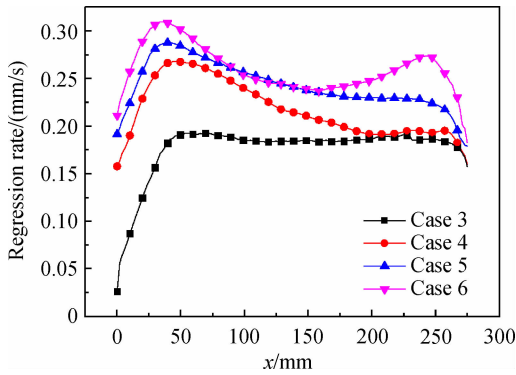


图 10 不同旋流强度时当地燃速曲线
Fig. 10 Local regression rate of different swirl intensities

为详细分析发动机工作性能,根据实验所测得相关参数对不同旋流强度下 SFRJ 工作性能参数进行了计算分析,具体结果如表 3 所示。由下表可知,平均燃速随旋流强度影响较大随着来流旋流强度的增强,与旋流强度成正比。相应导致空燃比降低。且随着旋流强度的增加,推进剂特征速度与发动机推力均会随之升高。说明在含碳黑聚乙烯推进剂中,其燃烧效率和发动机工作性能相比于无旋工况均有所提升。

表 3 不同旋流强度时 SFRJ 工作性能参数
Table 3 Working performance of SFRJ in different swirl intensities

Case	固体燃料	s	$\Delta m_t/\text{kg}$	$\dot{\bar{r}}/(\text{mm/s})$	A/F	$C^*/(\text{m/s})$	F/N
3	PE-C	0	0.202	0.1607	29.703	1107.108	166.1388
4	PE-C	0.2	0.272	0.2132	22.059	1161.621	188.4477
5	PE-C	0.4	0.290	0.2265	20.690	1192.848	199.8485
6	PE-C	0.6	0.305	0.2378	19.672	1232.444	214.3439

4 药柱内径对含碳黑固体燃料冲压发动机燃烧性能的影响

由图 11 可知不同药柱内径的压强变化趋势与前文所述相同。而在药柱内径为 60 mm 的工况下,发动机在点火器正常工作后出现了熄火现象。

稳定的后台阶回流是保持燃烧稳定建立的必要条件,而在药柱内径为 60 mm 工况下,发动机出现了熄火现象,根据文献[23]研究结果所示,在药柱内径为 60 mm,入口直径为 40 mm 工况下,后台阶回流不能稳定存在,所以在旋流工况下该药柱内径发动机出现熄火现象。

根据发动机工作过程所测得的温度、压力、燃速等参数计算了推力、比冲、特征速度等发动机的工作性能参数,见表 4。由表 4 可知,药柱内径与发动机推力、特征速度成正比,与平均燃速和空燃

比成反比。综上可知,药柱内径对推进剂燃烧效率有明显影响。但随着药柱内径的增大,平均燃速会有所降低,这对 SFRJ 工作性能而言是不利因素。

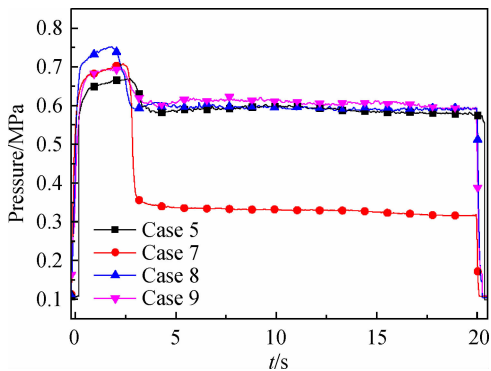


图 11 不同药柱内径情况下补燃室压强曲线
Fig. 11 Pressure profile of different port diameters of after burning chamber

表 4 不同药柱内径情况下 SFRJ 工作性能参数

Table 4 Performance parameters of SFRJ with different fuel port diameter

Case	固体燃料	d_p/mm	h_{stp}/mm	$\Delta m_t/\text{kg}$	$\dot{r}/(\text{mm/s})$	A/F	$C^*/(\text{m/s})$	F/N
5	PE-C	70	15	0.290	0.2265	20.6900	1192.848	199.8485
7	PE-C	60	10					
8	PE-C	80	20	0.301	0.2082	19.9336	1203.979	203.9981
9	PE-C	90	25	0.315	0.1953	19.0476	1215.713	208.9637

5 结 论

本章应用直连式实验系统,对 9 个不同工况的固体燃料冲压发动机点火实验,并通过实验获取了发动机相关工作参数,捕捉了发动机高清尾焰形态,并根据其工作过程中所测得参数计算得到了发动机工作性能相关参数。对不同工况下的发动机工作性能进行了详细分析,探究了发动机燃烧室药柱内径和来流旋流强度对其燃烧特性影响规律。主要得到了如下结论:

1) 碳黑添加可以有效改善固体燃料冲压发动机推进剂的平均燃速、特征速度和推力,且在旋流工况下对其工作性能的改善程度更加明显。在碳黑与旋流的共同作用下,发动机补燃室温度有明显升高,燃烧效率以及燃烧稳定性均有所增强。

2) 来流旋流强度的增强会使来流空气与推进剂热解产物的掺混更加充分,从而提升了发动机的燃烧效率与燃速。但当药柱内径减小至 60 mm 时,发动机后台阶回流不能稳定存在,最终导

致自持燃烧无法建立,发动机熄火。

3) 针对不同药柱内径发动机燃烧特性研究可知,固体燃料冲压发动机燃烧稳定性受药柱内径变化影响较大。较大的药柱内径对推进剂燃烧效率产生积极影响。但同时也会导致药柱平均燃速降低。

参考文献:

[1] 鲍福廷,黄熙军,张振鹏,等. 固体火箭冲压组合发动机[M]. 北京:北京宇航出版社,2006.

[2] ULAS A, KUO K K. Laser-induced ignition of solid propellants for gas generators[J]. Fuel, 2008, 87(6): 639-646.

[3] NABITY J, WALLS T. Side-dump solid fuel ramjet combustor evaluation[J]. Boston, US: AIAA, 1988.

[4] NETZER A, GANY A. Burning and flameholding characteristics of a miniature solid fuel ramjet combustor[J]. Journal of Propulsion and Power, 1991, 7(3): 357-363.

[5] SCHULTE G. Fuel regression and flame stabilization studies of solid-fuel ramjets[J]. Journal of Propulsion and Power, 1986, 2(4): 301-304.

[6] WOOLDRIDGE R C, NETZER D W. Ignition and flamma-

- bil-ity characteristics of solid fuel ramjet[J]. Journal of Propulsion and Power,1991,7(5):846-848.
- [7] HOEGL A,DUESTERHAUS D. Measurement in a solid fuel ramjet combustion with swirl[R]. Boston,US:AIAA,1988.
- [8] 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.
- [9] MUSA O,WEIXUAN L,XIONG C, et al. Experimental investigation on the effect of swirling flow on combustion characteristics and performance of solid fuel ramjet[J]. Acta Astronautica,2018,148:163-174.
- [10] 刘佩进,陈敬平,李葆萱. 丁铎/铝镁富燃推进剂燃烧实验[J]. 推进技术,2002,23(4):342-345.
LIU Peijin,CHEN Jingping,LI Baoxuan. Experimental investigation on the combustion behavior of aluminum-magnesium based fuel-rich propellant[J]. Journal of Propulsion Technology,2002,23(4):342-345. (in Chinese)
- [11] 王云霞,刘宇,陈林泉,等. 含硼推进剂固冲发动机补燃室内凝聚相燃烧产物特性实验研究[J]. 固体火箭技术, 2013,36(5):598-602.
WANG Yunxia,LIU Yu,CHEN Linqun, et al. Experimental study on the characteristics of condensed phase combustion products in the afterburning chamber of solid fuel ramjet with boron propellant[J]. Solid Rocket Technology,2013,36(5):598-602. (in Chinese)
- [12] PEIN R,VINNEMEIER F. Swirl and fuel composition effects on boron combustion in solid-fuel ramjets[J]. Journal of Propulsion and Power,1992,8(3):609-614.
- [13] STOWE R A,DUBOIS C,HARRIS P G, et al. Performance prediction of ducted rocket combustor using a simulated solid fuel[J]. Journal of Propulsion and Power,2004, 20(5):936-944.
- [14] DUPAYS J. Two-phase unsteady flow in solid rocket motors[J]. Aerospace Science and Technology,2002,6(6): 413-422.
- [15] 刘杰,李进贤,冯喜平,等. 旋转射流对含硼固体火箭冲压发动机二次燃烧的影响[J]. 推进技术,2011,32(3):355-359,382.
LIU Jie,LI Jinxian,FENG Xiping, et al. Influence of the swirl injection for secondary combustion of boron based ducted rocket[J]. Journal of Propulsion Technology,2011, 32(3):355-359,382. (in Chinese)
- [16] 王鸿美,陈雄,赵超. 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 Hongmei,CHEN Xiong,ZHAO Chao. Study on ignition and combustion characteristics of NEPE propellant under laser irradiation[J]. Journal of Propulsion Technology,2015,36(8):1262-1267. (in Chinese)
- [17] 刘巍,杨涛,胡建新,等. 固体燃料冲压发动机旋流燃烧特性实验[J]. 推进技术,2009,30(1):5-8.
LIU Wei,YANG Tao,HU Jianxin, et al. Study on cyclone combustion characteristics of solid fuel ramjet[J]. Journal of Propulsion Technology,2009,30(1):5-8. (in Chinese)
- [18] 代威,林宇震,张驰. 第 2 级径向旋流器旋流数对燃烧室点火和贫油熄火性能的影响[J]. 航空动力学报,2015,30(5):1092-1098.
DAI Wei,LIN Yuzhen,ZHANG Chi. Effect of swirl number of second-stage radial cyclone on ignition and lean blow-out of combustion chamber[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(5):1092-1098. (in Chinese)
- [19] 胡好生,蒋尧,卢克乾,等. 偏心对双级旋流器出口流场影响实验[J]. 航空动力学报,2015,30(5):1026-1031.
HU Haosheng,JIANG Yao,LU Keqian, et al. Experiment of the influence of eccentricity on the flow field at the outlet of a two-stage cyclone[J]. Journal of Aerospace Power, 2015,30(5):1026-1031. (in Chinese)
- [20] 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,2017.
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,2017. (in Chinese)
- [21] 李唯暄,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)
- [22] 李唯暄,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[J]. 推进技术,2020,41(6): 1296-1304.
LI Weixuan,YANG Haitao,CHEN Xiong, et al. Effects of addition of carbon black and swirl flow on combustion performance of polyethylene fueled solid fuel ramjet[J]. Journal of Propulsion Technology,2020,41(6):1296-1304. (in Chinese)
- [23] LI Weixuan,CHEN Xiong. Investigation of the effect of geometry of combustor on combustion characteristics of solid-fuel ramjet with swirl flow[J]. Applied Thermal Engineering,2018,145(25):229-244.

(编辑:张 雪)