

3D打印骨架增强石蜡燃料燃烧机理实验研究^{*}

张子相, 武毅, 卢健程, 杨钧森, 王一尧, 王宁飞

(北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘要: 针对固-液混合火箭发动机中石蜡基固体燃料机械性能差的问题, 使用3D打印聚合物骨架镶嵌石蜡的方法增强了石蜡基燃料的结构强度, 分析了骨架增强石蜡燃料在直/旋流喷注下的燃烧机理。通过对七种骨架材料进行SEM扫描、力学、热力学分析和纯氧条件下的燃烧试验, 获得了不同骨架材料的微观表面结构、机械性能、热分解性能以及在纯氧环境下的燃烧性能; 使用直/旋流固-气掺混燃烧试验系统, 开展了螺旋型和六角型骨架增强石蜡燃料的燃烧试验, 并与ABS固体燃料进行了对比。结果显示, 在多种骨架材料中, ABS材料加工性能、机械性能及热分解性能良好; 燃烧过程中, 骨架增强石蜡燃料结构稳定性良好, 石蜡液滴主要出现在石蜡-骨架交界处; 旋流喷注和螺旋型骨架可促进石蜡液滴的夹带现象; 在直流喷注工况中, 骨架的凹槽结构增加了燃料与氧化剂的接触面积, 尾部骨架结构具有稳焰作用, 可促进后燃烧室的掺混燃烧; 石蜡燃料和骨架燃速差异较大, 发动机内弹道性能可能受此影响。

关键词: 石蜡燃料; 3D打印聚合物骨架; 旋流燃烧; 扩散燃烧; 固-液混合火箭发动机

中图分类号: V436.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 05-200992-08

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200992

Experimental Study on Combustion Mechanism of 3D Printing Skeleton Enhanced Paraffin Fuel

ZHANG Zi-xiang, WU Yi, LU Jian-cheng, YANG Jun-sen, WANG Yi-yao, WANG Ning-fei

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Aiming at the issues of poor mechanical properties of paraffin-based fuel grains in hybrid rocket motors, the method of embedding 3D printing polymer skeleton into paraffin-wax was used to enhance the structural strength of paraffin-based fuel grains. The influence mechanism of direct flow/swirl injection on the combustion performance of 3D printing skeleton enhanced paraffin fuel was investigated. First, through SEM, mechanical performance test, thermodynamic analysis and combustion test under pure oxygen conditions of seven types of skeleton materials, their microscopic surface structure, mechanical properties, thermal decomposition performance and combustion performance are obtained. Then, using the direct flow and swirling solid-gaseous hybrid combustor system, combustion experiments of the helical and hexagonal skeleton enhanced paraffin fuel grain were carried out and compared with the ABS grain. The results show that among a variety of skeleton materials, ABS material has good processing properties, mechanical properties and thermal decomposition properties. During the combustion process, skeleton enhanced paraffin fuel grain has good structural stability, and the paraffin

^{*} 收稿日期: 2020-12-14; 修订日期: 2021-03-03。

基金项目: 国家自然科学基金 (51906016)。

作者简介: 张子相, 硕士生, 研究领域为固-液/凝胶混合火箭发动机工作过程。

通讯作者: 武毅, 博士, 副研究员, 研究领域为火箭发动机内的燃烧与流动。

引用格式: 张子相, 武毅, 卢健程, 等. 3D打印骨架增强石蜡燃料燃烧机理实验研究[J]. 推进技术, 2022, 43(5): 200992. (ZHANG Zi-xiang, WU Yi, LU Jian-cheng, et al. Experimental Study on Combustion Mechanism of 3D Printing Skeleton Enhanced Paraffin Fuel[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(5):200992.)

droplets mainly appeared at the paraffin-skeleton junction. Swirl injection and spiral skeleton promote the phenomenon of paraffin droplet entrainment. In direct flow condition, the groove structure of skeleton increases the contact area between the fuel and the oxidizer, and the tail skeleton has a flame stabilizing effect, which can promote the combustion in the post combustion chamber. The regression rate of paraffin fuel and skeleton is quite different, and the internal ballistic performance of the motor may be affected by this.

Key words: Paraffin-based fuel; 3D printed polymer skeleton; Swirling combustion; Diffusion combustion; Hybrid rocket motor

1 引言

随着航天技术的发展,发射任务及成本控制对火箭发动机的重复使用和多次点火能力要求越来越高,成本低、稳定性高、可重复启动的固-液混合火箭发动机是近年来的研究热点^[1]。然而,由于固-液混合发动机中的燃烧过程为扩散燃烧,传统固体燃料退移速率较低^[2]。石蜡基燃料由于熔点低,燃烧过程中存在液滴夹带现象,具有退移速率高的优点。但是,石蜡燃料的机械性能较差,在燃烧室高温环境中,易发生软化或脱落,存在安全隐患,极大地影响发动机内弹道性能。如何在不降低石蜡燃料退移速率的前提下提升其机械性能,成为亟须解决的问题^[3-4]。

研究表明,在石蜡中添加热固性或热塑性聚合物粘结剂可增强其机械性能,但会增加燃料的表面张力和粘度,阻碍熔化燃料液滴的夹带,降低退移速率^[5-8]。Kim等^[7]向石蜡中添加5%~10%的PE,尽管机械性能和燃烧效率得到提升,但固体燃料的退移速率降低。武毅等^[8]通过向石蜡燃料中添加硬化剂等成分,对石蜡基固体燃料进行了改性研究,结果表明,添加剂成分可提高石蜡燃料的机械强度。王印等^[9]向石蜡中加入HTPB,固体燃料力学性能得到增强。此外,向石蜡中添加金属颗粒可以提升机械强度、燃烧效率和燃料密度^[10-11]。然而,在混合和铸造过程中,掺混不均可能导致燃烧不稳定、高压敏感性和添加材料浓度不均匀等问题。

使用本身能够燃烧的骨架结构承载石蜡燃料,可以提高石蜡基燃料的机械强度,同时保留石蜡退移速率高的优点。随着增材制造技术的发展,3D打印能够制造复杂骨架结构,将其镶嵌至石蜡燃料中,可有效提高石蜡基固体燃料的结构强度。Arnold等^[12]将石蜡填充到3D打印的蜂窝状丙烯酸聚合物中,对不同结构的固体燃料进行了点火实验。Whitmore^[13]开展了丙烯腈-丁二烯-苯乙烯热塑性塑料(ABS)与N₂O的燃烧实验研究,发现尽管ABS比HT-

PB燃烧性能差,但其燃烧一致性更高。McCulley等^[14]对ABS-石蜡组合燃料的燃烧过程开展了仿真和试验研究,结果表明ABS增强了燃料的机械性能,提高了嵌入石蜡的退移速率。Bisin等^[15-16]对含聚乳酸、ABS、尼龙骨架的三种石蜡基燃料进行了压缩和燃烧试验,结果表明骨架结构极大提升了石蜡燃料的机械性能。Wang等^[17]对螺旋型ABS骨架增强石蜡燃料进行了发动机点火试验,结果表明,骨架增强固体燃料的退移速率较纯石蜡燃料更高。

固-液混合发动机中,固体燃料的退移速率除受本身性能影响外,还与氧化剂/固体燃料热解气体的流动状态有关。研究表明,在燃烧室中增加挡板、增长后燃烧室长度等可增强湍流程度,提高退移速率和掺混燃烧效率,但会增加发动机整体长度和重量^[18-19];使用螺旋型装药能够在燃烧室中产生涡流,可提高燃料退移速率,但由于石蜡燃料熔点低,机械性能差,螺旋结构难以长时间保持^[20];使用旋流喷注,可使氧化剂更加靠近燃料表面,大幅增加燃料表面热流密度^[2],延长氧化剂在燃烧室中的停留时间,有效提高燃料的退移速率和燃烧效率^[21]。Takashi等^[22]研究了旋流喷注时固体燃料的退移速率,并拟合了不同喷注方式的燃料退移速率模型。王印等^[23]研究了氧化剂喷注方式对石蜡燃料的燃烧过程的影响,结果显示,切向旋流喷注有助于提高石蜡燃料的退移速率和燃烧效率。

本文对常见的七种3D打印材料(高韧性树脂、9400树脂、耐高温树脂、ABS、透明树脂、黑色尼龙、尼龙玻纤)开展了试验研究,以找到适用于石蜡基固体燃料的骨架材料。通过SEM、单轴拉伸试验、热重分析比较不同骨架材料的表面结构、机械性能和热分解性能,并测量了骨架材料在纯氧条件下的表面火焰传播速度。将ABS固体药柱和螺旋型骨架、六角型骨架增强石蜡燃料药柱在直流/旋流固-气掺混燃烧可视化试验系统中进行燃烧试验,研究骨架结构、直/旋流喷注对石蜡基固体燃料燃烧过程的影响机理。

2 方 法

2.1 3D 打印材料分析方法

首先对七种 3D 打印材料的原材料、加工方法和密度等参数进行了研究,具体信息见表 1。

骨架材料应具有加工精度高,机械性能、热分解性能强的特点。使用日立 S-4800 扫描电子显微镜扫描各材料表面结构;基于 GB/T 1040-2006 标准对各材料进行单轴拉伸试验测试其抗拉性能;使用精工 6300TG/DTA 热重分析仪将各材料在空气环境中从 20℃ 加热到 600℃,开展热重分析,研究其热分解性能。

2.2 燃烧试验方法

在固-液混合发动机中,骨架材料和石蜡燃料同时燃烧,骨架材料的燃烧性能直接影响发动机整体性能。因此,本工作首先对骨架材料在纯氧环境下的燃烧性能进行了研究,测量了骨架燃料纯氧条件下的表面火焰传播速度;然后,为分析骨架结构、喷注方式对骨架增强石蜡基固体燃料燃烧性能的影响,利用固-气掺混燃烧器,开展了骨架增强石蜡燃料的掺混燃烧试验研究。

2.2.1 材料表面火焰传播速度测量系统

图 1 为骨架材料的表面火焰传播速度测量系统:氧气由质量流量控制器从底部通入,通过陶粒使氧气流速均匀,并充满整个石英玻璃管,药条直径为 2mm,石英玻璃管内径为 70mm。置于中心的固体燃料药条从顶部点燃,使用相机记录燃烧过程,通过图像处理计算材料的表面火焰传播速度。

2.2.2 固-气掺混燃烧试验系统

本研究搭建了固-气掺混燃烧试验系统(见图 2),系统由燃烧器、气体供应系统、数据采集系统组成。其中,燃烧器由喷注头部、石英玻璃罩(主燃烧室)、后燃烧室三部分组成。固体燃料通过螺栓固定在主燃烧室中心,使用氧气作为氧化剂。氧气通过头部喷注进入主燃烧室与固体燃料发生掺混燃烧。燃烧

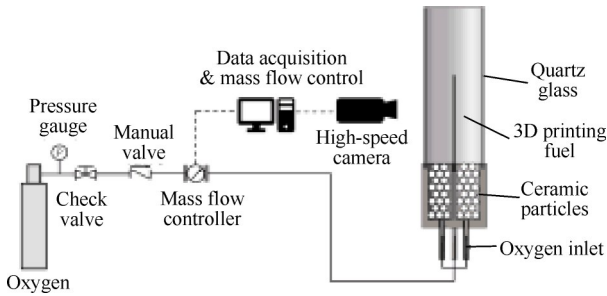
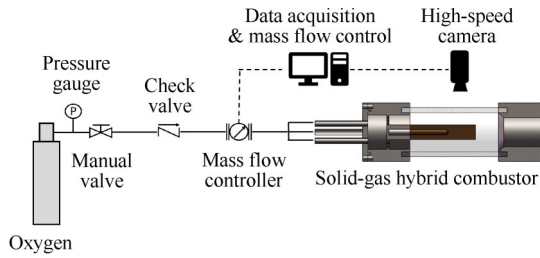
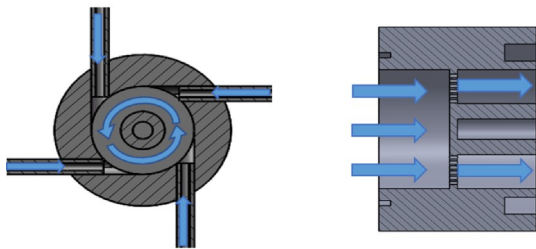


Fig. 1 Flame propagation speed test device



(a) Solid-gas hybrid combustor



(b) Swirl injection (c) Direct flow injection

Fig. 2 Schematic of experimental set-up for the visualization system

器喷注头部分为旋流和直流喷注两种。旋流喷注系统,见图 2(b),有四个切向的氧化剂入口,使氧化剂以切向旋流形式进入主燃烧室;直流喷注系统,见图 2(c),有四个轴向的氧化剂入口,通过筛板结构保证氧化剂流动周向分布均匀。氧化剂流量通过质量流量控制器调节,使用高速相机记录各固体燃料与氧气的掺混燃烧过程。

2.2.3 聚合物骨架增强石蜡燃料

本研究分别设计了螺旋型骨架、六角型骨架增

Table 1 Basic information of 3D printing materials

ID	Name	Raw material	Method	Density/(g·cm ⁻³)
M1	High-toughness resin	Godart®8228	Stereo lithography apparatus	1.18
M2	9400 resin	Godart®8118		1.18
M3	Heat-resistant resin	Godart®8318		1.19
M4	ABS	Godart®ABS8228		1.14
M5	Transparent resin	Godart®8001		1.12
M6	Black nylon	HP®PA 11	Selective laser sintering	1.05
M7	Glass-fiber reinforced nylon	HP®PA 11 + 30%wt glass-fiber		1.22

强石蜡基燃料,见图3~4。两种骨架增强石蜡燃料均为直径15mm,长度62mm,其中螺旋型骨架螺距6mm、槽深4.5mm,槽宽4mm;六角型骨架壁厚2mm,槽深4.5mm。石蜡燃料镶嵌在聚合物骨架中,构成最终的圆柱形石蜡燃料药柱。在螺旋型骨架增强石蜡燃料中,石蜡体积占比53.8%;六角型骨架增强石蜡燃料中石蜡体积占比54.3%。

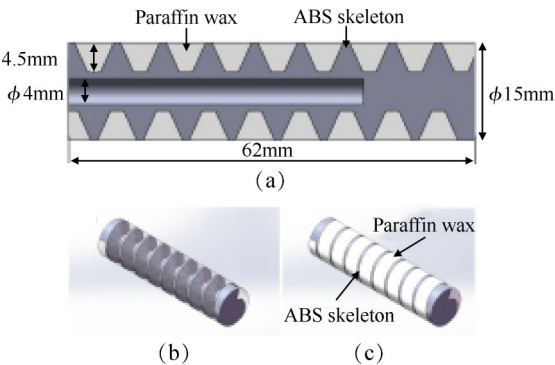


Fig. 3 Helical ABS skeleton reinforced paraffin fuel

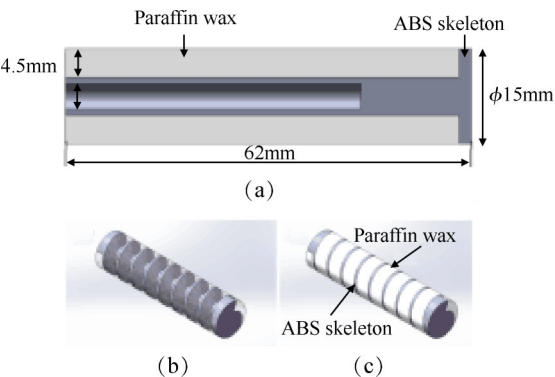


Fig. 4 Hexagonal ABS skeleton reinforced paraffin fuel

3 结果与讨论

3.1 3D打印材料性能分析

对不同骨架材料的表面结构、机械性能、热分解性能、燃烧性能试验结果进行分析,筛选出合适的骨

架材料。

3.1.1 表面结构

图5为SEM得到的材料表面结构50000倍放大图像,可见树脂类与尼龙类材料表面结构区别较大:树脂类材料表面更加光滑整洁,尼龙类表面粗糙。这是因为树脂类材料使用立体光固化技术(Stereo lithography apparatus),液态光敏树脂材料在紫外激光束照射下快速固化成型,加工表面光滑。而尼龙类材料使用选择性激光烧结技术(Selective laser sintering),利用红外激光将尼龙粉末加热至融化,与下方已成型部分进行烧结实现粘结,导致表面粗糙,加工精度低。

3.1.2 机械性能

骨架材料需有较好的机械性能以保证装药在工作过程中的结构完整性。表2为七种材料的机械性能参数,图6展示了七种材料的应力-应变曲线。

Table 2 Mechanical properties of 3D printing materials

ID	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa
M1	65.52	2.52396
M2	50.73	1.85881
M3	52.83	2.55164
M4	57.55	2.22974
M5	51.11	1.98917
M6	40.95	0.81653
M7	27.23	1.23781

可见,不同骨架材料的抗拉强度排序为:高韧性树脂>ABS>耐高温树脂>透明树脂>9400树脂>黑色尼龙>尼龙玻纤;弹性模量排序为:耐高温树脂>高韧性树脂>ABS>透明树脂>9400树脂>尼龙玻纤>黑色尼龙。此外,树脂类材料的抗拉强度均超过50MPa,弹性模量超过1800MPa,其中高韧性树脂抗拉强度最高,为65.52MPa,耐高温树脂弹性模量最高,为2551.64MPa,远高于黑色尼龙和尼龙玻纤,尼龙玻纤

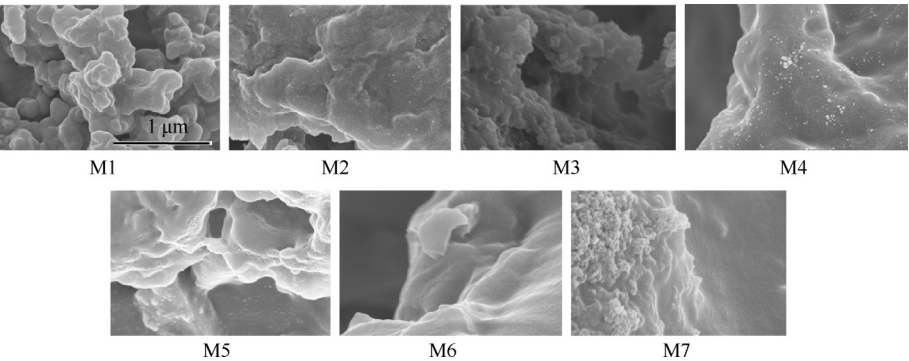


Fig. 5 Surface structure of different 3D print materials(50000×)

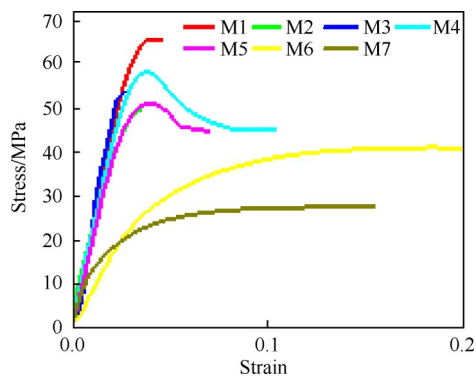


Fig. 6 Stress-strain curve of different 3D print materials

由于掺有 30% 玻璃纤维,弹性模量高于黑色尼龙。

3.1.3 热分解性能

图 7(a)和图 7(b)为空气环境中不同骨架材料的热重结果(TG,DTG),由于初始质量不同,对质量进行了归一化处理。

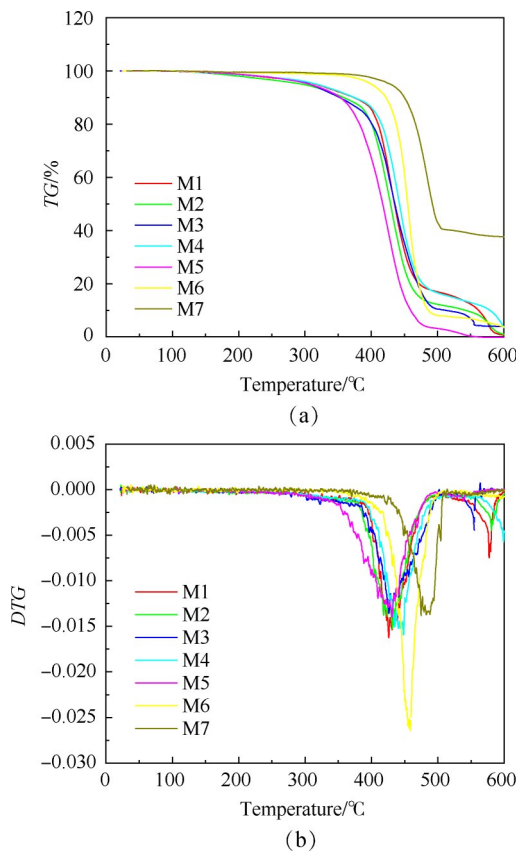


Fig. 7 TG and DTG curve of different 3D printing materials

可见,不同骨架材料的分解速率由高到低依次为黑色尼龙>高韧性树脂>ABS>9400 树脂>透明树脂>耐高温树脂>尼龙玻纤。在空气环境下,树脂类材料在 350℃左右开始热解,当温度达到 400℃时开始快速热解,其中高韧性树脂和 ABS 热解温度稍高于其他几种树脂材料,透明树脂在达到 550℃时完全

热解成气体;黑色尼龙的热解速度在几种材料中最快;温度达到 600℃时,材料 M1~6 完全热解成气体挥发,而尼龙玻纤(M7)仍有部分质量残留,这是由于尼龙玻纤中的玻璃纤维在该温度下并不会热解成气体,因此,玻璃纤维的存在可能会增加发动机两相流损失并污染管路。

3.1.4 聚合物材料表面火焰传播速度

图 8 展示了黑色尼龙在 5L/min 的氧气流量工况下,不同时刻的火焰图像,相邻图像时间间隔为 1s。骨架材料的表面火焰传播速度由相邻图像火焰底部位置随时间变化计算得到,结果见图 9。

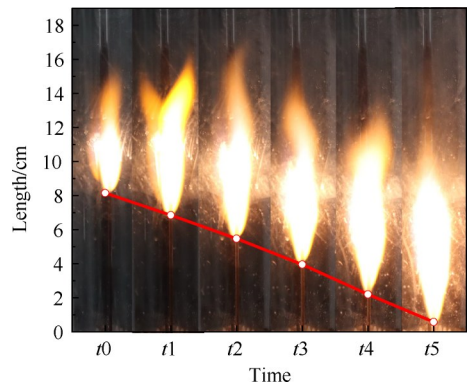


Fig. 8 Flame configuration of black nylon fuel in oxygen environment

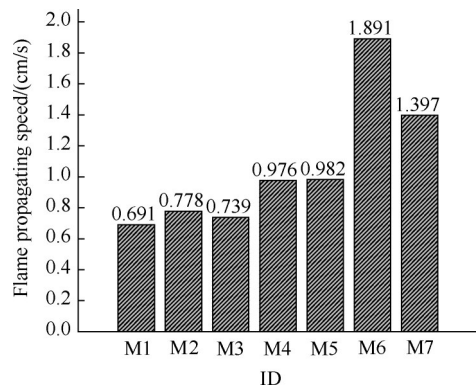


Fig. 9 Flame propagating speed of different 3D printing materials

不同骨架材料表面火焰传播速度由高到低依次为:黑色尼龙>尼龙玻纤>透明树脂>ABS>9400 树脂>耐高温树脂>高韧性树脂。可见,尼龙类材料火焰传播速度高于树脂类材料,这是由于打印技术的不同,导致尼龙类材料表面粗糙,增大了与氧气的接触面积所致。此外,由于玻璃纤维燃烧性能差,尼龙玻纤的火焰传播速度低于黑色尼龙。实验中还发现,尼龙类材料燃烧会产生黑色胶状残留物,在实际发动机中,可能会导致较大的两相流损失,且可能会影响

喷管的正常工作。

综合 SEM 扫描、单轴拉伸试验、热重分析、火焰传播速度等几项试验结果,对不同骨架材料进行比较可知,尽管尼龙类材料表面粗糙,火焰传播速度更快,但机械性能较差,加工精度低,且燃烧后存在残留物影响发动机工作;在树脂类材料中,ABS 的机械性能、热分解性能以及表面火焰传播速度最优。高韧性树脂机械性能和热分解性能与 ABS 相近,但表面火焰传播速度较低。因此,后续研究中选择 ABS 作为石蜡燃料的骨架材料。

3.2 旋流/直流喷注燃烧试验结果

使用固-气掺混燃烧器,分别对纯 ABS、螺旋、六角型骨架增强石蜡燃料药柱,开展直流和旋流喷注燃烧实验。本研究中石蜡燃料为 58# 全精炼石蜡,骨架材料均为 ABS,氧化剂为 O_2 ,流量为 40L/min。

3.2.1 直流/旋流喷注燃烧分析

图 10(a),(b) 分别为 ABS 在氧化剂直流/旋流喷注工况下的燃烧图像。

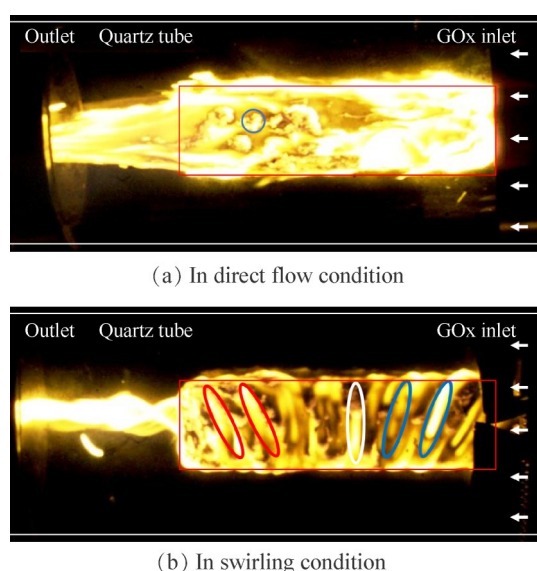


Fig. 10 Burning image of ABS grain

直流喷注中,火焰受氧化剂吹拂出现波动,在燃料表面轴向分布不均匀。由于燃料头部氧化剂充足,燃烧剧烈,火焰更加明亮,锋面更长;随着氧化剂的消耗,燃料中部火焰亮度有所减弱,火焰锋面变短;在燃料尾部,流动受到出口处收缩段的影响,火焰逐渐向燃烧室中轴线收缩。在燃烧过程中,可见部分颗粒从固体燃料表面脱落。

旋流喷注中,氧化剂轴向速度较低,氧化剂运动路径更长,燃料表面燃烧更稳定。燃料表面存在三个方向的火焰,头部火焰向氧气入口旋转,中部火焰

无偏转,尾部火焰向出口处旋转。这是由于入口处氧化剂高速转动,在头部产生低压区,导致燃料和氧化剂向燃烧室头部扩散,可提高燃烧室头部温度,起到稳定头部火焰的作用;在燃料尾部,火焰方向与氧气旋流运动方向一致,沿压力梯度流出燃烧室;燃料中部处于过渡区,火焰无偏转沿周向燃烧,可见燃料表面脱离颗粒运动轨迹与此一致。在后燃烧室中,由于旋流作用,后燃烧室中心压强低,火焰向中心收缩,宽度小于直流喷注工况,旋转方向与氧化剂入口处旋转方向一致,高温区域集中在后燃烧室轴线附近,有利于缩短后燃烧室长度,降低后燃烧室热防护难度。

3.2.2 骨架增强石蜡燃料燃烧分析

图 11 为螺旋、六角型骨架结构增强石蜡燃料在直流/旋流喷注下的燃烧图像。

燃烧过程中,可清晰观察到气流夹带石蜡液滴运动,并伴随液滴蒸发、燃烧现象。相较于 ABS 燃料,火焰不再只存在于燃料表面,火焰直径明显增加。由于存在骨架结构,燃烧过程中未出现石蜡燃料软化坍塌、整体脱落现象。此外,由于石蜡燃料退移速率高于骨架材料,燃烧开始后,燃烧速度较慢的骨架材料逐渐突显出来。通过 CEA 软件计算,在氧化剂流量 40L/min 条件下,燃烧室内为贫燃燃烧,初始时当量比为 0.72,随着燃烧进行当量比降低。燃烧产物主要以 CO_2 , H_2O , 以及 CO 为主^[24-25]。

骨架增强石蜡燃料相比纯 ABS 燃料,燃烧更加剧烈。这是因为,石蜡燃烧速度高于 ABS,且骨架结构的存在增加了燃料与氧化剂接触面积和燃烧室的湍流强度,进一步促进燃烧。

3.2.2.1 直/旋流喷注对石蜡燃烧的影响

在旋流喷注中,见图 11(a)和(b),可见较多的石蜡液滴滴落、飞溅,火焰仍呈螺旋状,且分布不均匀,尾部火焰主要在顶部。这是由于石蜡液滴受到旋流氧气夹带,受离心力和重力的双重作用,脱离燃料表面,燃料顶部的石蜡液滴更容易进入气流中,火焰更旺盛,底部石蜡液滴受重力作用直接滴落,燃烧路径短,燃烧不完全。

在直流喷注中,见图 11(c)和(d),由于石蜡液滴只受重力和轴向氧化剂气流夹带,燃烧室底部的石蜡液滴相较旋流喷注大为减少。石蜡液滴从燃料主体脱离后即进入气流中发生燃烧,火焰在燃烧室中分布更均匀。在骨架凹槽内火焰更明亮,这可能是由于骨架结构阻碍了氧化剂的轴向扩散,在凹槽内部出现涡流,且凹槽内氧化剂/燃料接触面积更大,促

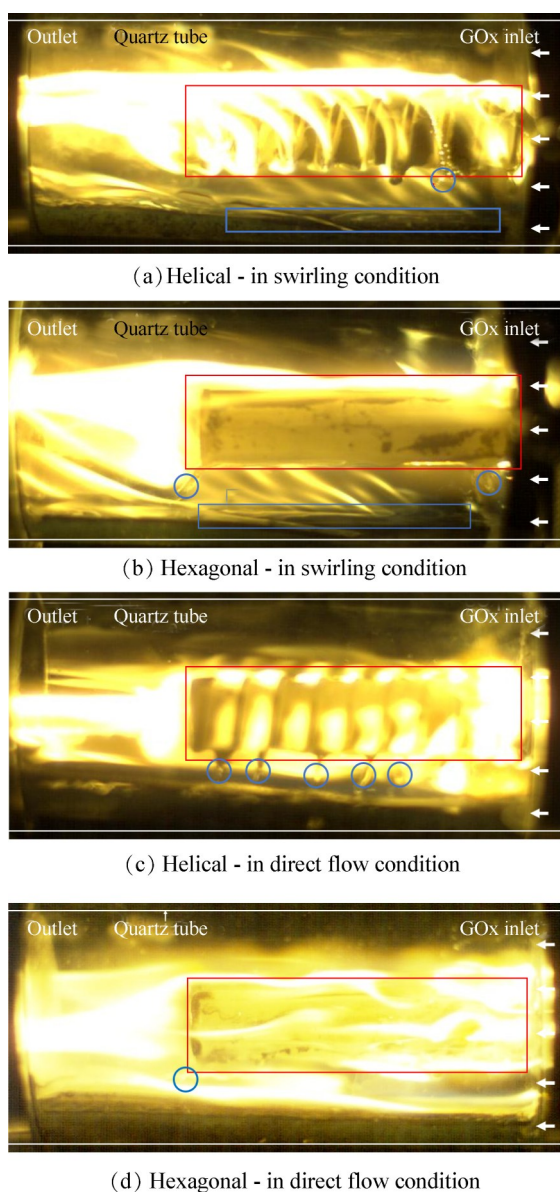


Fig. 11 Burning image of ABS skeleton enhanced paraffin fuel grain

进了氧气与石蜡燃料的掺混燃烧。

3.2.2.2 骨架结构对石蜡燃烧的影响

由于ABS燃料退移速率低于石蜡燃料,燃烧开始后不久,燃料表面不再平整,骨架结构逐渐凸显,因此,骨架结构对掺混流动的影响较大。

在直流喷注中,螺旋型骨架显著增强了燃烧室中湍流强度,凹槽内燃烧更剧烈,且骨架结构阻碍石蜡液膜的轴向扩散,促进液滴夹带;而六角形骨架对湍流强度提升较小,骨架结构对液膜的剪切作用小,液滴主要出现在骨架尾部挡板处。

在旋流喷注中,由于螺旋骨架螺旋方向与氧化剂旋流方向相反,螺旋骨架与六角形骨架对石蜡液膜的剪切作用相近,显著促进了液滴夹带现象,提高

石蜡基燃料退移速率,但对燃烧室湍流强度提升较小。

4 结论

通过本文研究,得到以下结论:

(1)通过对七种骨架材料的筛选研究,ABS材料表面结构、机械性能、热分解性能、燃烧性能良好,作为骨架材料性能较优。

(2)骨架结构保证了石蜡基燃料燃烧过程中的结构稳定,增强了燃烧室内湍流强度,增大了氧化剂/燃料接触面积,可促进氧化剂/燃料掺混燃烧。

(3)骨架增强石蜡燃料中,石蜡液滴主要出现在石蜡-骨架的交界处。螺旋骨架在直/旋流喷注工况中显著促进液滴夹带现象,六角形骨架在直流喷注中对液滴夹带现象促进作用较小。

(4)石蜡燃料和骨架退移速率差异较大,石蜡燃尽后,骨架的低退移速率可能导致发动机性能发生较大的变化。

致谢:感谢国家自然科学基金的资助。

参考文献

- [1] 蔡国飙. 固液混合火箭发动机技术综述与展望[J]. 推进技术, 2012, 33(6): 831-839. (CAI Guo-biao. Development and Application of Hybrid Rocket Motor Technology[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(6): 831-839.)
- [2] 杨玉新, 胡春波, 何国强, 等. 固液混合火箭发动机中的关键技术及其发展[J]. 宇航学报, 2008, 29(5): 1616-1621.
- [3] Kuo K K, Chiaverini M J. Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Propulsion[M]. New York: AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics Series, 2007.
- [4] Karabeyoglu M, Cantwell B, Altman D. Development and Testing of Paraffin-Based Hybrid Rocket Fuels[C]. Salt Lake City: 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2011.
- [5] Paravan C, Galfetti L, Maggi F. A Critical Analysis of Paraffin-Based Fuel Formulations for Hybrid Rocket Propulsion[C]. Atlanta: 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2017.
- [6] Paravan C, Bisin R, Carlotti S, et al. Diagnostics for Entrainment Characterization in Liquefying Fuel Formulations[C]. Cincinnati: 54th AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2018.
- [7] 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

- (11): 1750–1760.
- [8] Wu Yi, Yu Xilong, Lin Xin, et al. Experimental Investigation of Fuel Composition and Mix-Enhancer Effects on the Performance of Paraffin-Based Hybrid Rocket Motors [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 82/83 (11): 620–627.
- [9] 王 印, 王 飞, 胡松启, 等. 石蜡/HTPB燃料的力学性能[J]. 含能材料, 2019, 27(5): 398–403.
- [10] Karabeyoglu A, Cantwell B, Castellucci P, et al. Scale-Up Tests of High Regression Rate Paraffin-Based Hybrid Rocket Fuels [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2004, 20(6): 1037–1045.
- [11] Ryu S, Han Seongjoo, Kim Jinkan. Tensile and Compressive Strength Characteristics of Aluminized Paraffin Wax Fuel for Various Particle Size and Contents [J]. *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 2016, 20(5): 70–76.
- [12] Arnold D M, Boyer J E, Kuo K, et al. Test of Hybrid Rocket Fuel Grains with Swirl Patterns Fabricated Using Rapid Proto-Typing Technology[C]. *San Jose: 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2013.
- [13] Whitmore S A. Comparing Hydroxyl Terminated Polybutadiene and Acrylonitrile Butadiene Styrene as Hybrid Rocket Fuels [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2013, 29(3): 582–592.
- [14] McCulley J, Bath A, Whitmore S. Design and Testing of FDM Manufactured Paraffin-ABS Hybrid Rocket Motors [C]. *Atlanta: 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2012.
- [15] Bisin R, Paravan C, Alberti S, et al. An Innovative Strategy for Paraffin-Based Fuels Reinforcement, Part I: Mechanical and Pre-Burning Characterization [C]. *Madrid: 8th European Conference for Aerospace Sciences*, 2019.
- [16] Bisin R, Paravan C, Verga A, et al. An Innovative Strategy for Paraffin-Based Fuels Reinforcement, Part II: Ballistic Characterization [C]. *Madrid: 8th European Conference for Aerospace Sciences*, 2019.
- [17] Wang Zezhong, Lin Xin, Li Fei, et al. Combustion Performance of a Novel Hybrid Rocket Fuel Grain with a Nested Helical Structure[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 97(2).
- [18] 王明鉴, 杜 新, 何洪庆, 等. 燃烧室结构对固液火箭发动机燃烧与流动的影响研究[J]. 固体火箭技术, 2005, 28(4): 249–252.
- [19] 王鹏飞, 田 辉, 俞南嘉, 等. 药柱含扰流板 H_2O_2 /HTPB 固液火箭发动机两相流数值计算[J]. 航空动力学报, 2013, 28(11): 2621–2626.
- [20] Tian Hui, Li Yuelong, Li Chengen, et al. Regression Rate Characteristics of Hybrid Rocket Motor with Helical Grain [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 68 (9): 90–103.
- [21] Knuth W, Gramer D, Chiaverini M, et al. Development and Testing of a Vortex-Driven, High-Regression Rate Hybrid Rocket Engine [C]. *Cleveland: 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 1998.
- [22] Takashi T, Yuasa S, Yamamoto K. Effects of Swirling Oxidizer Flow on Fuel Regression Rate of Hybrid Rockets [C]. *Los Angeles: 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 1999.
- [23] 王 印, 胡松启, 刘林林, 等. 含石蜡燃料在固液混合发动机中的燃烧效率研究[J]. 推进技术, 2020, 41 (8): 1807–1813. (WANG Yin, HU Song-lin, LIU Lin-lin, et al. Combustion Efficiency of Paraffin-Based Fuels in Hybrid Rocket Motor [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(8): 1807–1813.)
- [24] 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.
- [25] 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 (5): 2138–2145. (TANG Yue, 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(5): 2138–2145.)

(编辑:朱立影)