

文章编号: 1006-9941(2014)04-0498-05

含石蜡燃料的能量特性和退移速率测试

胡松启, 武冠杰, 刘欢, 王鹏飞

(西北工业大学 燃烧、热结构与内流场重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要: 含石蜡燃料是固液混合火箭发动机的理想能源, 采用最小自由能法在富氧、富燃和最佳氧燃比条件下对组分含量不同的含石蜡燃料和端羟基聚丁二烯 (HTPB) 燃料进行能量特性计算, 利用固气矩形混合发动机测试含石蜡燃料和 HTPB 燃料的退移速率。能量特性计算结果表明: 在相同组分配方下, 加入 AP 使燃料中含氧量增多、最佳氧燃比和比冲降低, 加入 Al 能提高燃烧室温度和密度比冲; 在相同氧燃比下, 含石蜡燃料和 HTPB 燃料的比冲基本相同。退移速率实验结果表明: 在氧气质量流率从 $25 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $40 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 石蜡燃料的退移速率从 $0.79 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $1.11 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, HTPB 燃料的退移速率从 $0.47 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $0.68 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; 石蜡燃料的退移速率约为普通 HTPB 燃料的 1.58~1.74 倍。

关键词: 宇航推进理论与工程; 含石蜡燃料; 混合发动机; 能量特性; 氧燃比; 退移速率

中图分类号: TJ55; V512

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.04.014

1 引言

含石蜡燃料作为新型高退移速率的固液混合发动机燃料, 近年来受到广泛关注。石蜡密度、燃烧热值和 HTPB 相当, 而退移速率是端羟基聚丁二烯 (HTPB) 燃料的 3~4 倍^[1]。在美国国防部先进研究项目局 (DARPA) 和美国航空航天局埃姆斯研究中心 (NASA Ames) 的支持下, 斯坦福大学 (Stanford) 配制了 SP-La 石蜡基燃料, 进行了超过 300 次发动机地面试车试验^[2]。1999 年, 斯坦福大学将直径 50.8 mm, 长 1.7 m 的含石蜡燃料混合火箭发射至 1829 m 高度^[3]。2003 年, 斯坦福大学联合洛克希德·马丁公司又进行了两次飞行试验, 飞行高度分别为 4600, 1670 m。2004 年, 斯坦福研究生设计并制造了外径 3 in 的石蜡燃料混合探空火箭, 飞行高度为 2871 m, 总冲达 $3500 \text{ N} \cdot \text{s}$ ^[4]。

对固液混合发动机中燃料的能量特性进行分析, 是研究燃料配方设计和组分选择的重要手段。吴俊峰^[5]通过能量特性分析, 认为 HTPB 燃料和含石蜡燃料与同种氧化剂 (液氧、98% H_2O_2 、 N_2O) 组合后, 能量特性基本相同, 燃料的不同添加物中, AlH_3 能显著

提高发动机真空比冲, Al 能显著提高燃料密度比冲。刘长宝^[6]对 HTPB 推进剂进行能量分析得到, 随着固体含量 (高氯酸铵、铝粉等) 的增加, 推进剂理论比冲也不断增加。国内外对固液混合发动机固体燃料燃烧特性的研究有很多, 影响最深远的是 Marxman^[7] 在 19 世纪 60 年代提出的扩散控制理论, 研究认为固液混合火箭发动机中促进固体燃料燃烧的主要原因是扩散火焰对燃料热解表面的换热作用, 并归纳得到燃料退移速率与氧化剂流率的关系式。陈灏^[8]通过热平板导热实验研究, 得到固体燃料表面温度与燃速的变化关系。杨玉新^[9]通过建立固液混合火箭发动机固体燃料瞬态退移速率预示的数值模型, 得到固体燃料热解表面的温度以及退移速率随着发动机的工作时间的关系。但以上文献均未对含石蜡燃料的退移速率及其影响因素进行研究。

本研究通过计算含石蜡燃料和 HTPB 燃料不同配方的能量特性, 采用固气矩形混合发动机端面燃烧法进行点火实验, 测量燃料试样在混合发动机内的压强、退移速率等参数, 分析不同组分燃料、氧气密流等因素对退移速率的影响。

2 燃料能量特性分析

采用吉布斯最小自由能法^[10], 对固气混合火箭发动机的燃烧室和喷管进行热力计算, 通过比较不同组分燃料配方的能量特性参数, 分析不同组分含量对燃

收稿日期: 2013-10-13; 修回日期: 2014-01-27

基金项目: 西北工业大学研究生创业种子基金 (Z2014032) 和航天支撑基金 (NAXA0003)

作者简介: 胡松启 (1976-), 男, 副教授, 主要从事固体推进剂及燃烧研究。e-mail: pinecore@nwpu.edu.cn

料能量特性的影响。

本研究中能量特性计算条件:初始温度为300 K,燃烧室工作压强为3.4 MPa,喷管扩张面积比 $A_e/A_t=70$, (其中 A_e 为喷管出口面积, A_t 为喷管喉径),氧化剂采用液氧。待计算的燃料配方如表1所示,燃料的配方主要由丁羟、石蜡、Al、Mg、AP和C组成,其中H0~H3为HTPB配方燃料,S0~S5为含石蜡配方燃料。各燃料配方的能量特性计算结果如表2所示:H1~H3和S1~S5的最佳氧燃比 $O/F=1.9$, $O/F=1.6$ 为富燃时氧燃比, $O/F=2.4$ 为富氧时氧燃比(此时,H0和S0达到最佳氧燃比)。

表1 含石蜡燃料和HTPB燃料的配方表

Table 1 Formulations of paraffin-based fuel and HTPB fuel

sample	%					
	HTPB	Paraffin	Al	Mg	AP	C
H0	100	0	0	0	0	0
H1	78	0	6	6	0	10
H2	73	0	6	6	5	10
H3	83	0	6	6	5	0
S0	0	100	0	0	0	0
S1	58	15	6	6	5	10
S2	48	25	6	6	5	10
S3	38	35	6	6	5	10
S4	32	35	12	6	5	10
S5	28	45	6	6	5	10

表2 不同氧燃比条件下燃料能量特性

Table 2 Energy characteristics of fuels at different O/F

sample	O/F					
	1.6		1.9		2.4	
	T_f /K	I_s /N·s·kg ⁻¹	T_f /K	I_s /N·s·kg ⁻¹	T_f /K	I_s /N·s·kg ⁻¹
H0	3095	3145	3451	3316	3639	3414
H1	3471	3288	3656	3359	3710	3316
H2	3557	3314	3680	3353	3697	3279
H3	3514	3343	3657	3389	3689	3322
S0	3020	2997	3409	3188	3581	3293
S1	3552	3292	3673	3331	3687	3258
S2	3549	3278	3668	3317	3680	3244
S3	3545	3263	3663	3303	3672	3230
S4	3693	3294	3750	3280	3725	3191
S5	3541	3249	3657	3288	3665	3215

Note: O/F—the ratio of oxidizer and fuel, T_f —the temperature of chamber, I_s —the specific impulse.

由表2可以看出:

(1) 比较H1和H2,在氧燃比为1.6时,H2的比

冲比H1高 $26 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$,在氧燃比分别为1.9和2.4时,H2的比冲比H1低 $6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $37 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。可见,AP含量增加可增多燃料的氧含量、降低最佳氧燃比,但比冲下降。

(2) 比较H2和H3,在氧燃比为1.6、1.9和2.4时,H2的燃温分别比H3高43K、23K和8K。H2的比冲比H3低 $29 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $36 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $43 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。随着氧燃比不断增加,C含量对燃温的影响逐渐减弱,对比冲的作用也不断降低。

(3) 比较S0~S5和H0~H3,在氧燃比为1.9时石蜡燃料和HTPB燃料比冲达到最大,分别为 $3331 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3389 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$,石蜡燃料和HTPB燃料的比冲效果基本相同。

(4) 比较S3和S4,在氧燃比为1.6时,S4的比冲比S3大 $31 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$,在氧燃比分别为1.9和2.4时,S4的比冲比S3低 $23 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $39 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$,且S4的燃温总高于S3。可见,加入Al能提高燃烧室温度,而比冲略微降低。但Al密度($2.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)是HTPB密度($0.91 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)的2倍多,加入Al能有效提高燃料密度比冲。

通过对表2不同配方能量特性进行对比,分析燃料中组分含量的不同对能量特性的影响。同时,考虑到石蜡的高退移速率和制作工艺,选取石蜡含量为35%的S3和其余组分含量与之相同的H2作为理想配方。对H2和S3进行不同氧燃比含量的计算,进一步分析氧燃比对比冲性能的影响。设定条件如下:燃烧室初始温度为300 K,燃烧室工作压强为3.4 MPa,喷管扩张面积比 $A_e/A_t=70$,氧化剂采用液氧,氧燃比 $O/F=1.5 \sim 3.0$ 。H2和S3的氧燃比与比冲的关系如图1所示。

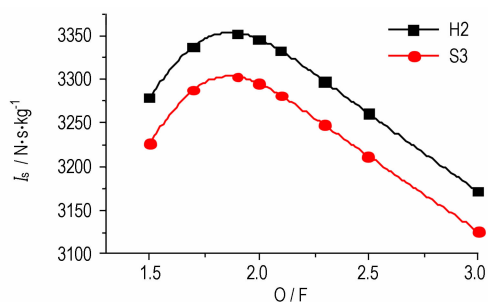


图1 H2和S3比冲随氧燃比的变化

Fig. 1 Curves of I_s of H2 and S3 with the change of O/F

由图1可知,H2和S3在氧燃比为1.9时,比冲达到最大分别为 $3353.0 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3303.1 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$,最佳氧燃比为1.9。当O/F低于1.9时,随着氧化剂

质量流率的增加, 燃料反应充分, 燃烧释放的热量增多, 发动机的比冲随之增大。超过最佳氧燃比 1.9 后, 部分氧气不再反应, 增大氧化剂质量流率对燃料的反应几乎没有影响, 反而随着氧气的增多比冲降低。

3 固体燃料退移速率测试

为了研究氧气质量流率对退移速率的影响, 采用固气矩形混合发动机对含石蜡燃料 S3、HTPB 燃料 H2 进行点火实验。通过测量“压强—时间”曲线确定燃料工作时间, 利用燃料肉厚和工作时间的比值得到燃料在当前工况下的平均退移速率^[11]。通过分析不同配方和氧气质量流率对退移速率的影响, 得到氧气密流与退移速率的关系式。

实验装置图如图 2 所示, 主要包括氧气瓶、减压阀、电磁阀、单向阀和流量调节器, 通过调节减压阀和流量调节器确保氧气质量流率在发动机工作过程中稳定进行。图 3 为固气矩形发动机的点火实验, 发动机结构示意图见图 3a, 发动机工作过程图见图 3b 所示。

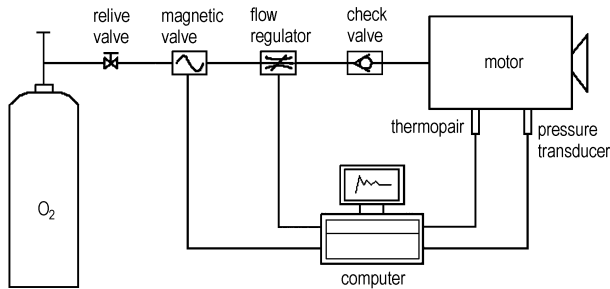


图 2 固气混合发动机测试系统

Fig. 2 Gas-solid hybrid engine testing system

先利用计算机控制电磁阀和流量调节器, 将氧气按预定质量流率喷入燃烧室。待氧气质量流率与燃烧室压强稳定后, 通过点火装置将固体燃料点燃, 利用压

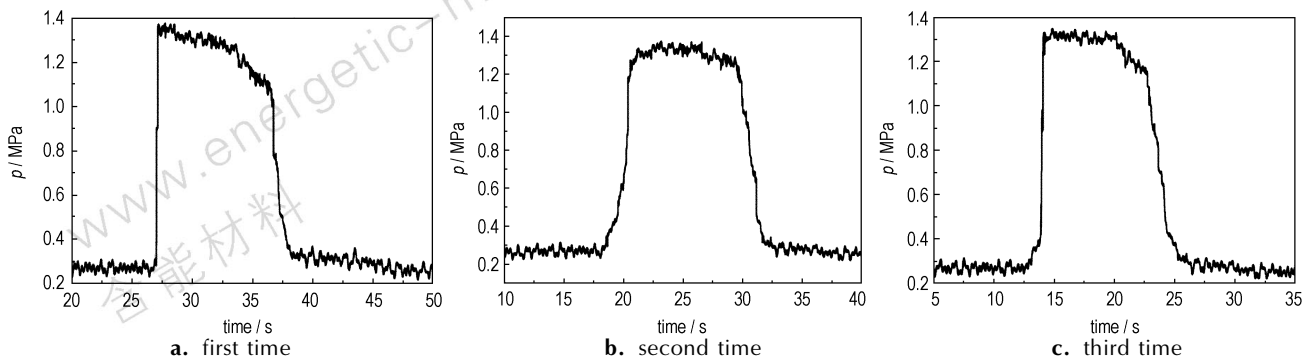
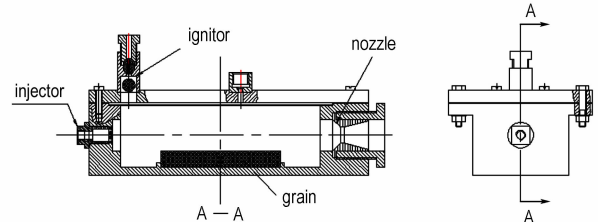


图 4 石蜡燃料三次重复性实验的 $p-t$ 曲线

Fig. 4 Three repeated experimental pressure-time ($p-t$) curves of paraffin-based fuel

强传感器和热电偶测得燃烧室的压强与温度。

实验中所采用的燃料配方为表 1 中的 H2 和 S3, 选择实验的工作压强为 1~2 MPa。为了减小压强变化对退移速率的影响, 在氧气质量流率为 25, 30 $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 选择喷管喉径为 8 mm; 在质量流率为 35, 40 $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 选择喷管喉径为 10 mm, 以保证燃烧室工作平均压强在一定的变化范围内。



a. sketch map of rectangular engine



b. paraffin-based fuel ignite experimental device

图 3 固气矩形混合发动机实验

Fig. 3 Experiment of solid-gas rectangular hybrid engine

4 结果与分析

4.1 实验重现性分析

在氧气质量流率为 40 $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$, 喷管喉径为 10 mm 工况下, 对肉厚相同的石蜡燃料 S3 进行三次退移速率测试, 三次实验测得的 $p-t$ 曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,工作稳定后实验的 $p-t$ 曲线均没有出现大的跳跃,三次重复性实验所得退移速率为 1.08 、 1.09 、 $1.16 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值为 $1.11 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,相对误差分别为 2.70% 、 1.80% 、 4.50% 。考虑到固气混合发动机中,影响退移速率的综合因素(氧气质量流率、燃料表面固相与气相反应等)较多,认为上述实验结果相对误差在可接受范围内。

4.2 石蜡和氧气质量流量对退移速率影响

在不同氧气质量流率下,对两种配方燃料 H2 和 S3 分别作 3 次点火实验,取其中有效实验的平均值作为燃料的实际退移速率,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,在氧气质量流率分别为 25 、 30 、 35 、 $40 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,石蜡燃料 S3 的退移速率分别是 HTPB 燃料 H2 退移速率的 1.68 、 1.74 、 1.58 、 1.63 倍。可见,

在相同的质量流率下,含石蜡燃料的退移速率高于普通的 HTPB 燃料。对相同配方,随着氧气质量流率的增加,燃料退移速率也不断增加。

在发动机工作时,氧气通过喷盘均匀进入燃烧室,与固体燃料反应生成大量的热,使燃料表面融化形成一层液体薄膜,在液体表面气流的作用下,石蜡燃料快速雾化形成液滴进入气相^[1]。而 HTPB 燃料燃烧时并不能快速雾化^[12]。石蜡液滴的雾化极大地增强了燃料的质量运输,从而提高了表面退移速率,这种高退移速率属于石蜡燃料本身的一种属性。混合发动机中,由于氧化剂质量流率的增加,燃料表面气流速度增大,向固体燃料表面扩散程度加剧,导致固体燃料的表面温度升高,增加表面热反馈、燃烧反应更加剧烈,从而退移速率增加^[13]。

表 3 氧气质量流率对 H2 和 S3 燃料退移速率的影响

Table 3 Effect of oxidizer mass rate on the H2 and S3 fuel's regression rate

	$\dot{m}/\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$							
	25		30		35		40	
	r_{S3} / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	r_{H2} / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	r_{S3} / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	r_{H2} / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	r_{S3} / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	r_{H2} / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	r_{S3} / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	r_{H2} / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
first time	0.75	0.44	0.94	0.57	1.02	0.65	1.08	0.65
second time	0.80	0.52	0.92	0.50	1.01	0.64	1.09	0.69
third time	0.82	0.45	0.96	0.55	0.97	0.60	1.16	0.70
average	0.79	0.47	0.94	0.54	1.00	0.63	1.11	0.68
average $\frac{r_{S3}}{r_{H2}}$	1.68		1.74		1.58		1.63	

Note: \dot{m} is the oxidizer mass flow rate, r is the regression rate.

4.3 退移速率与氧气密流的关系

已有文献研究成果表明^[11-13],固液混合火箭发动机的固体燃料退移速率一般受燃烧室压强影响较小,而受燃料配方、燃烧室结构和氧化剂密流 G_o 影响较大。其中,燃料退移速率与氧化剂密流之间满足经验关系式^[7]:

$$r = aG_o^n, G_o = \dot{m}/A_p \quad (1)$$

式中, a 、 n 是实验得到的经验参数; G_o 为氧化剂密流, $\text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; \dot{m} 为氧化剂质量流率, $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$; A_p 为燃烧通道的横截面积, cm^2 。实验中测得 $A_p = 56 \text{ cm}^2$ 。

根据表 3 所得的数据,可拟合得到 H2 配方和 S3 配方的退移速率与氧气密流关系曲线,见图 5。

由图 5 及式(1)可得, H2 和 S3 的退移速率:
 $r_{H2} = 0.1323 G_o^{0.7822} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; $r_{S3} = 0.249 G_o^{0.7103} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

燃料的退移速率随着氧气质量流率的增加而增加,石蜡燃料的退移速率明显高于 HTPB 燃料的退移

速率。本研究中石蜡燃料退移速率约为 HTPB 的 2 倍,与文献[1]中结论基本相同。

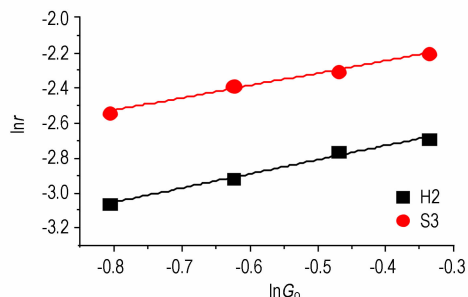


图 5 燃料退移速率与氧气密流关系的拟合曲线

Fig. 5 The fitting curves of fuel regression rate and G_o .

5 结论

(1) 在氧燃比为 1.9 时,石蜡燃料和 HTPB 燃料达到最大理论比冲分别为 3331 、 $3389 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$,石蜡燃料

和 HTPB 燃料的理论比冲效果基本相同; 加入 AP 使燃料中氧含量增多, 但最佳氧燃比和比冲下降; 加入 Al 能提高发动机燃烧室温度和密度比冲。

(2) 在氧气质量流率分别为 25, 30, 35, 40 $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下, 石蜡燃料(S3)的退移速率分别为 0.79, 0.92, 1.00, 1.11 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$, HTPB 燃料(H2)的退移速率分别为 0.47, 0.54, 0.63, 0.68 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在相同的氧气质量流率下, 含石蜡燃料的退移速率高于普通的 HTPB 燃料。在相同的配方下, 随着氧气质量流率的增加, 燃料退移速率也不断增加。

参考文献:

- [1] Karabeyoglu M A, Cantwell B J, Altman D. Development and testing of paraffin-based hybrid rocket fuels[C] // 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE, 2001-4503.
- [2] Arif Karabeyoglu, Greg Ziliac, Brian J Cantwell, 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.
- [3] Karabeyoglu M A, Greg Ziliac, Paul Castellucci, et al. Development of high-burning-rate hybrid-rocket-fuel flight demonstrations[C] // 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE, 2003-5196.
- [4] D. Van Pelt, J. Hopkins, M. Skinner, et al. Overview of a 4-inch OD paraffin-based hybrid sounding rocket program[C] // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE, 2004-3822.
- [5] 吴俊峰, 李新田, 田辉, 等. 固液火箭发动机推进剂组合能量特性分析[J]. *固体火箭技术*, 2013, 36(2):225-229.
WU Jun-feng, LI Xin-tian, TIAN Hui, et al. Analysis of the energy characteristics of hybrid rocket motor propellant combinations[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2013, 36(2):225-229.
- [6] 刘长宝, 刘云飞, 姚维尚. 高固体含量丁羟推进剂性能研究[J]. *含能材料*, 2007, 15(1):42-45.
LIU Chang-bao, LIU Yun-fei, YAO Wei-shang. Characteristics of HTPB propellant with high solid contents[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(1):42-46.
- [7] Marxman G A, Wooldridge C E, Muzzy R J. Fundamentals of hybrid boundary layer combustion[C] // AIAA Heterogeneous Combustion Conference, 1963-505.
- [8] 陈灏, 胡春波, 孙得川, 等. 固体燃料热分解特性分析[J]. *固体火箭技术*, 2008, 31(1):69-71.
CHEN Hao, HU Chun-bo, SUN De-chuan, et al. Analysis on pyrolysis behavior of solid fuel[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2008, 31(1):69-71.
- [9] 杨玉新, 胡春波, 秦飞, 等. 固体发动机固体燃料瞬态退移速率[J]. *推进技术*, 2008, 29(5):533-538.
YANG Yu-xin, HU Chun-bo, QIN Fei, et al. Study of instantaneous regression rate in hybrid rocket motor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(5):533-538.
- [10] Dan Vladimir Nichita, Susana Gomez, Eduardo Luna. Multi-phase equilibria calculation by direct minimization of Gibbs free energy with a global optimization method[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2002, 26(3):1703-1724.
- [11] 王鹏飞. 含石蜡燃料的燃烧性能研究[D]. 西安:西北工业大学硕士学位论文, 2013. 4.
WANG Peng-fei. Research on combustion properties of paraffin-contained fuel[D]. Xi'an: Master Thesis of Northwestern Polytechnical University, 2013.4.
- [12] Karabeyoglu M A, Altman D, Cantwell B J. Combustion of liquefying hybrid propellants: part I general theory[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2002, 18(3):610-620.
- [13] 李宇飞, 何国强, 刘佩进. 固液混合发动机的新宠——石蜡基燃料[J]. *火箭推进*, 2005, 31(4):36-40.
LI Yu-fei, HE Guo-qiang, LIU Pei-jin. Advances in hybrid rocket: paraffin-based fuel[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2005, 31(4):36-40.

Energy Characteristics and Regression Rate Measurement of Paraffin-based Fuel

HU Song-qi, WU Guan-jie, LIU Huan, WANG Peng-fei

(Science and Technology on Combustion Internal Flow and Thermal-Structure Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The paraffin-based fuel is an ideal power for the solid-liquid hybrid-engine. The energy characteristics of paraffin-based fuel and HTPB fuel were calculated by minimum free energy method under more oxidizer, more fuel, and the optimal oxygen-fuel ratio working conditions. The regression rate of paraffin-based fuel and HTPB fuel were tested by rectangle solid-gas hybrid engine. The energy characteristics results show that: the fuel's oxygen contents are increased by adding AP, but the optimal oxygen-fuel ratio and specific impulse are both reduced. The chamber temperature and density specific impulse are improved by adding Al, and the specific impulse of paraffin-based fuel and HTPB fuel are basically similar. The regression rate results show that: with the increasing oxidizer mass flow rate from 25 $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ to 40 $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$, the regression rate of paraffin-based fuel is improved from 0.79 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ to 1.11 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$, the regression rate of HTPB fuel is improved from 0.47 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ to 0.68 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$; the regression rate of paraffin-based fuel is higher than that of the common HTPB fuel about 1.58-1.74 times.

Key words: aerospace propulsion theory and engineering; paraffin-based fuel; hybrid engine; oxygen-fuel ratio; energy characteristics; regression rate

CLC number: TJ55; V512

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.04.014