

吸热型碳氢燃料与高温合金 相容性研究

张忠利, 李 斌, 张蒙正, 周立新

(中国航天科技集团公司 西安航天动力研究所, 西安 710100)

摘 要: 论证了吸热型碳氢燃料与高温合金相容性研究过程, 设计了燃油与高温合金联合加热装置, 测试了非钝化和钝化状态的 GH625 试件和 GH3128 试件在壁温为 500~850℃时、经过燃油压力为 3.5 MPa、燃油温度为 450~500℃、流速为 1~5 m/s 浸渍后的力学性能和金相组织. 试验结果表明: 在燃料温度为 500℃、试件温度为 850℃时, GH3128 试件结焦量少于 GH625 试件, GH3128 试件的塑性应力下降 40%、GH625 试件的塑性应力下降 60%. 燃油浸渍时高温合金钝化后结焦量明显减少.

关 键 词: 吸热型碳氢燃料; 高温合金; 相容性; 传热; 力学性能

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Consistent capacity research on endothermic hydrocarbon fuels and superalloy

ZHANG Zhong-li, LI Bin, ZHANG Meng-zheng, ZHOU Li-xin

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710100, China)

Abstract: The course of consistent capacity research was demonstrated from endothermic hydrocarbon fuels and nickel-base-alloy, and the co-heating device was designed for the fuels and alloy. The mechanical capacity and metallographic diagram were gained, whenever the passivated test-slices of GH625 and GH3128 were put under wall temperature about 500—850℃, pressure about 3.5 MPa, fuel temperature about 450—500℃, and velocity about 1—5 m/s fuels. The experiment results showed that, under the fuel temperature about 500℃ and test-slice temperature about 850℃, the coking capacity of GH3128 was less than GH625, and the plastic stress declined about 40% for GH3128 and 60% for GH625. After the test-slice of alloy was passivated, the coking capacity was obviously cut down.

Key words: endothermic hydrocarbon fuels; nickel-base-alloy;

consistent capacity; heat transfer; mechanical capacity

热防护^[1-4]是超燃冲压发动机研制过程中遇到的关键技术之一. 燃料主动冷却是长时间工作的燃烧室采用的热防护措施^[5-6], 由于燃料流量小, 燃料流经燃烧室壁时燃料温度逐渐升至临界点、超临界状态、裂解状态, 燃烧室壁与裂解状态的高温燃油长时间浸渍^[7-12]后, 燃料裂解后的碳

颗粒附着在材料表面后, 将影响其力学性能和导热性能, 这一过程的研究成果有利于主动冷却结构选材. 基于此本文研究了 GH3128 与 GH625 光试件和钝化试件的壁温在 500~850℃时、经过燃油压力为 3.5 MPa、燃油温度为 450~500℃、流速为 1~5 m/s 浸渍后的力学性能和金相组织.

1 试验简介

1.1 试验方案传热分析

高温合金与吸热型碳氢燃料相容性^[13-18]研究方案:标准的力学拉伸试件,燃料与标准力学试件在定温定压定流量下长时间浸渍、同一温度状态测试力学性能。

高温合金与燃料相容性研究试件拟采用两个标准试件串联而成,经精密测量两个试件的质量和电阻值,利用有内热源的非稳态微分方程,可以计算得到试件表面的壁温随加热电功率的变化曲线。试验前通过传热分析设定试件表面的空载温度值。试验时流动的热燃料冲刷不断受热的试件,燃料流过热表面时,继续通电加热,加热热流到达设定值,热流设定值范围是超燃冲压发动机主动冷却计算热流范围。试件表面温度达到空载温度值时,燃料的流速控制方式有两个,一个是通过流量控制,另外一个是通过温度控制,燃料流速大约不低于 1 m/s,不高于 5 m/s。试件方案简图见图 1。试件温度平衡时间通过非稳态传热^[13]方法分析。

$$\frac{\partial t_w}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 t_w}{\partial x^2} \right) + \frac{\dot{Q}}{\rho c_p} \quad (1)$$

式中 t_w 为壁面温度, τ 为时间, λ 热导率, ρ 密度, c_p 为比定压热容, $\dot{Q}$ 为内热源。

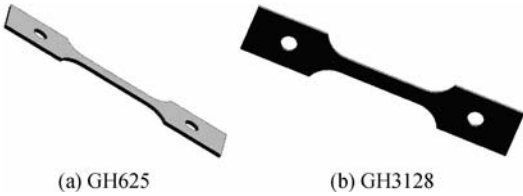


图 1 试件结构简图

Fig. 1 Scheme of test-slice configuration

当仅仅只有电加热时其边界条件为

$$Q = A_w h_0 (t_w - t_0) + \epsilon_w \sigma A_w \left(\frac{t_w}{100} \right)^4 \quad (2)$$

当煤油流动时其边界条件为

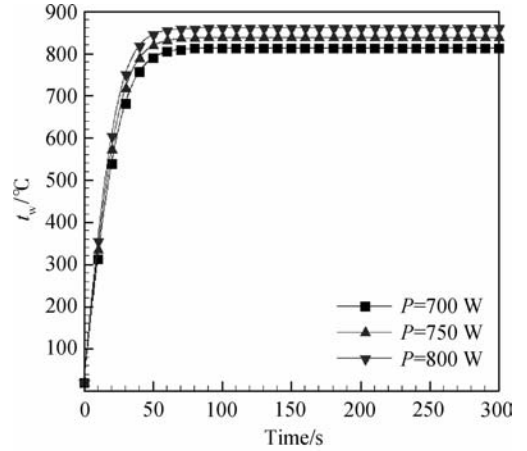
$$Q = A_w h_1 (t_w - t_0) + \epsilon_w \sigma A_w \left(\frac{t_w}{100} \right)^4 \quad (3)$$

式中 Q 为试件与外界交换的热量, σ 为玻尔兹曼常数, ϵ_w 为辐射系数, m_w 为试件质量, A_w 为试件表面积, h_0 为试件与外界的综合传热系数。

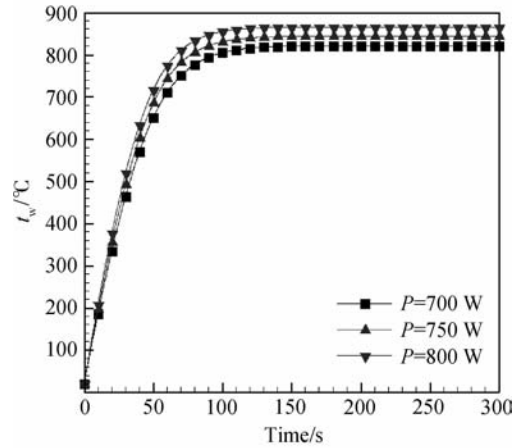
$$\dot{Q} = I^2 R = I^2 \xi \left(\sum_i \frac{L_i}{A_i} \right) \quad (4)$$

式中 I 为电流, R 为电阻, ξ 为电阻率, L_i 为长度。

将试件参数和电源参数代入式(1)~式(4)得到试件在不同电源功率(P)下的壁温随时间的变化,见图 2。



(a) GH3128试件



(b) GH625试件

图 2 GH3128 和 GH625 试件在不同加热功率时壁温随时间变化曲线

Fig. 2 Wall temperature change curve of GH625 and GH3128 test-slice varying with time at different heating power

从图 2 可以看出:若采用定功率加热试件,当加热功率为 800 W 时,试件表面温度可达到 850 °C,热平衡时间约为 100 s。单一试件加热时,当加热功率为 800 W 时,热流大约为 162 kW/m²。

1.2 试验系统

试件为两种材料,分别为 GH3128 试件和 GH625。试件安装在图 3 的工装内,在工装内表面喷涂抗氧化、耐高温、能绝缘的 ZrO₂,与工装壳体以外的连接部件采用了绝缘处理,电极采用水冷措施。测温 and 测压装置也进行了高温高压绝缘和密封处理。

试验台原理简图见图 4。

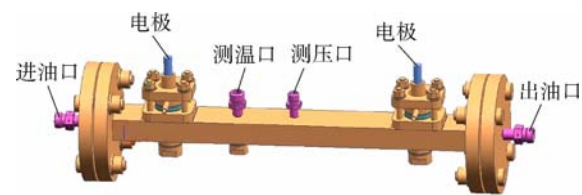


图 3 试件工装
Fig. 3 Frock of test-slice

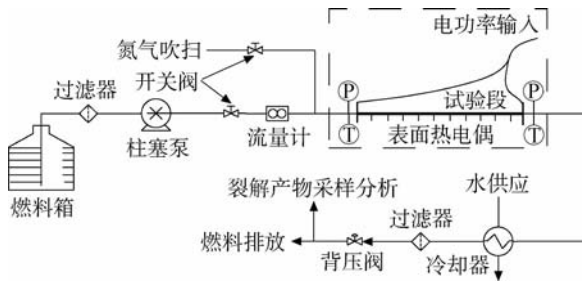


图 4 碳氢燃料流动传热及裂解试验台
Fig. 4 Test-bed of endothermic hydrocarbon's heat transfer and coking

试验系统用氮气检漏,氮气充背压;开启燃料泵供给流量,流量计测试并控制流量;燃料先后经预热器、加热段、冷凝器,背压罐收集. 试验过程中,主要通过调节电流来实现不同功率的压力、沿程压差、加热段表面温度.

2 高温合金与吸热型碳氢燃料相容性试验

2.1 联合加热试验

每种试件均进行了未钝化和钝化的试验. 为了节约研究成本,钝化试件的试验仅是对比试验. GH3128 试件和 GH625 试件联合加热过程中测试的稳态参数见表 1 和表 2.

表 1 和表 2 中参数说明: q_{ml} 为燃油流量, p_l 为燃油压力, $t_{l,in}$ 为燃油入口温度, $t_{l,out}$ 为燃油出口温度, $t_{t,w}$ 为试件平均温度, $t_{w,in}$ 为工装入口壁温, $t_{w,out}$ 为工装出口壁温, U 为试件两端电压, I 为试件两端电流.

表 3 和表 4 为 GH3128 试件和 GH625 试件联合加热后的照片.

表 1 GH3128 试件稳态测试参数

Table 1 GH3128 test-slice steady state test parameter

试验	试件代号	$q_{ml}/(\text{g/s})$	p_l/MPa	$t_{l,in}/^{\circ}\text{C}$	$t_{l,out}/^{\circ}\text{C}$	$t_{t,w}/^{\circ}\text{C}$	$t_{w,in}/^{\circ}\text{C}$	$t_{w,out}/^{\circ}\text{C}$	U/V	I/A
未钝化试件	0922-02	30	3.2	440	438	520~600	418	412	5.52	188.96
	0923-01	30	3.2	462	448	610	330	310	4.35	177.98
	1016-01	30	3.0	500	480	879	450	440	7.62	249.02
	1016-02	30	3.0	510	505	853	460	450	6.69	260.74
钝化试件	1015-01	30	3.0	500	480	870	460	440	6.59	240.23
	1015-02	30	3.0	500	480	945	450	440	7.71	289.31

表 2 GH625 试件稳态测试参数

Table 2 GH625 test-slice steady state test parameter

试件试验	试件代号	$q_{ml}/(\text{g/s})$	p_l/MPa	$t_{l,in}/^{\circ}\text{C}$	$t_{l,out}/^{\circ}\text{C}$	$t_{t,w}/^{\circ}\text{C}$	$t_{w,in}/^{\circ}\text{C}$	$t_{w,out}/^{\circ}\text{C}$	U/V	I/A
未钝化试件	0922-01	28	3.2	430	445	540~550	180	420	3.42	229.25
	0923-02	28	3.2	510	498	705~710	470	460	5.13	260.01
	0924-02	28	3.0~3.2	495~500	490	850	460	460	6.15	321.53
	0925-04	29	3.05	500	480	850	450	440	6.15	346.44
钝化试件	1022-02	30	3.0	498	495	850		450	6.20	343.51
	1023-01	30	3.0	500	495	800	470	460	5.742	330.32

表 3 GH3128 试件联合加热试后照片
Table 3 GH3128 test-slice photo after heating tested

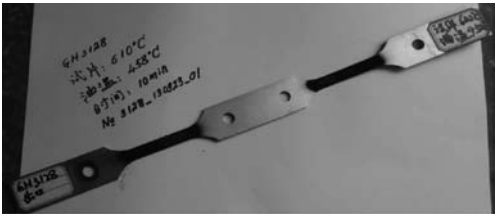
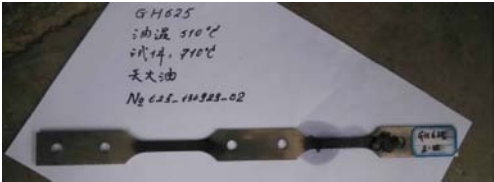
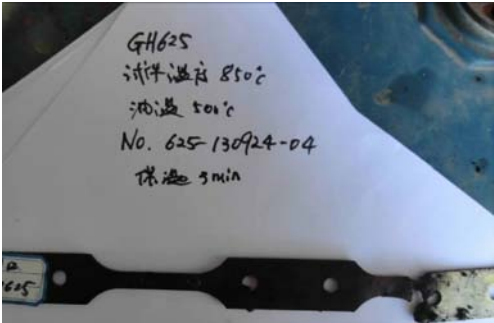
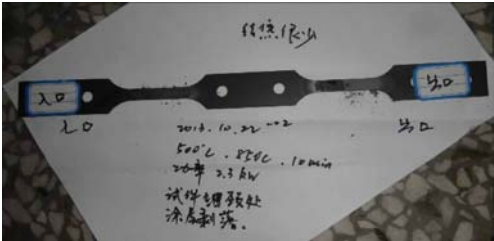
试件代号	试件照片	试后现象
0922-02 未钝化试件		拉断区附近结焦腐蚀相对多一些, 整个试件完好. 试后积炭结焦层易脱落.
0923-01 未钝化试件		拉断区有积炭结焦层, 整个试件完好.
1016-01 未钝化试件		入口拉断区熔断, 有较多结焦
1016-02 未钝化试件		试件完好无损, 有结焦.
1015-01 钝化试件		钝化膜可抑制结焦, 但是又限制了试件内部热量散失, 致使温度升高、熔断.
1015-02 钝化试件		入口拉断区熔断, 温度传感器失效, 致使加热功率与试件温度不同步.

表 4 GH625 试件联合加热试后照片

Table 4 GH625 test-slice photo after heating tested

试件代号	试件照片	试后现象
0922-01 未钝化试件		出口附近拉断区腐蚀结焦相对多一些, 整个试件完好无损.
0923-02 未钝化试件		拉断区腐蚀结焦相对多一些, 整个试件完好无损.
0924-02 未钝化试件		拉断区腐蚀结焦很严重, 腐蚀结焦层不易脱落.
0925-04 未钝化试件		拉断区有严重腐蚀结焦层, 极易脱落, 试件被烧断. 初步诊断为热电偶测试值低于实际温度, 致使不断加热, 因此试件被烧断.
1022-02 钝化试件		结焦很少, 拉断区钝化层有剥落.
1023-01 钝化试件		几乎没有结焦, 与试前变化不大.

试验结束后,未钝化试件的拉断区均出现不同程度的积炭结焦,随着温度的提高积炭结焦量逐渐增加,当试件温度超过 700℃后,试件拉断区出现腐蚀,腐蚀层厚度随温度提高而增加,腐蚀层的成分可金相监测.钝化试件仅进行了 850℃和 800℃结焦对比试验,从试验结果来看,结焦量明显降低,试件也未破坏,这一结论可以应用到主动冷却通道的加工工艺中.

2.2 力学性能测试和金相分析

将壁温 600,710,800,850℃的试件在 450℃和 500℃油温保温 10min 后,随后进行拉伸,测试其拉伸强度和塑性变形量.将腐蚀后的试件按此条件进行力学性能测试.

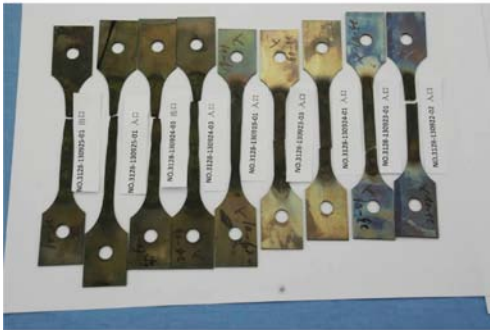
在 450℃油温中联合加热后,经 600℃拉伸, GH3128 试件和 GH625 试件强度略降,其中 GH3128 试件拉伸应力降低约 12%、塑性应力略升高, GH625 试件拉伸应力降低约 5%、塑性应力降低约 10%;经 710℃炉内拉伸,其拉伸应力、塑性应力降低,其中 GH3128 试件拉伸应力降低约 14%、塑性应力降低约 30%;GH625 试件拉伸应力降低约 16%、塑性应力降低约 45%.在 500℃油温中联合加热后,经 810℃拉伸, GH3128 试件和 GH625 试件拉伸应力略降、塑性应力降低.其中 GH3128 试件拉伸应力降低约 13%、塑性应力降低约 45%, GH625 试件拉伸应力降低约 6%、塑性应力降低约 50%;在 500℃油温中联合加热后,经 850℃拉伸, GH3128 试件和 GH625 试件拉伸应力降低、塑性应力也降低,其中 GH3128 试件拉伸应力降低约 12%、塑性应力降低约 40%, GH625 试件拉伸应力降低约 12%、塑性应力降低约 60%.

图 5 为拉伸断口的宏观形貌,拉伸断裂仍以表面开裂为裂纹源,这种开裂以 800℃以上的高温拉伸更为明显.试件在高温煤油中腐蚀结焦可降低合金的高温拉伸性能,尤其是拉伸塑性,其因为腐蚀结焦破坏了表层金属的完整性,发生了晶界腐蚀,裂纹自腐蚀晶界处萌生导致塑性降低.

还可以看出, GH3128 试件合金经重复加热腐蚀后,合金的拉伸强度与塑性大幅降低,分别大于 65%与 80%.这表明, GH3128 试件合金在这种腐蚀结焦条件下失效,不具备抗腐蚀结焦能力,导致这种失效的原因可能为试件的局部超温,图 6 为高温拉伸位移-载荷曲线(图中 0-1 和 0-2 表示标准样在 710℃的拉伸数据).



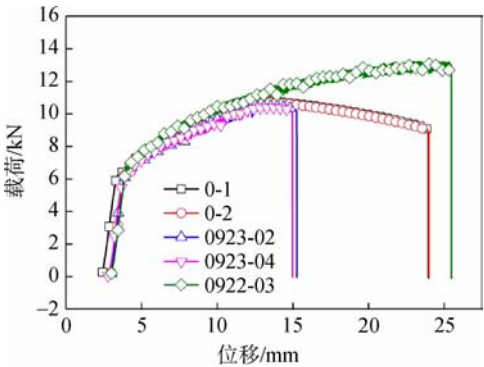
(a) GH625试件



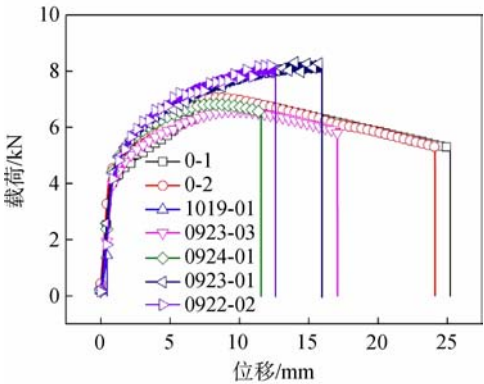
(b) GH3128试件

图 5 试样拉断后宏观形貌

Fig. 5 After the photo of test-slice snap



(a) GH625试件



(b) GH3128试件

图 6 高温拉伸位移-载荷曲线

Fig. 6 Interval-load curve in high temperature drag

为了分析燃料结焦对合金拉伸断裂原因的影响,对拉伸断口的侧面与正面进行光学显微镜、体视镜与扫描电子显微镜观察及能谱分析. GH3128 试件与 GH625 试件的拉伸断裂云图,如图 7、图 8 所示. 其中,(a)图为断口侧面体视镜形

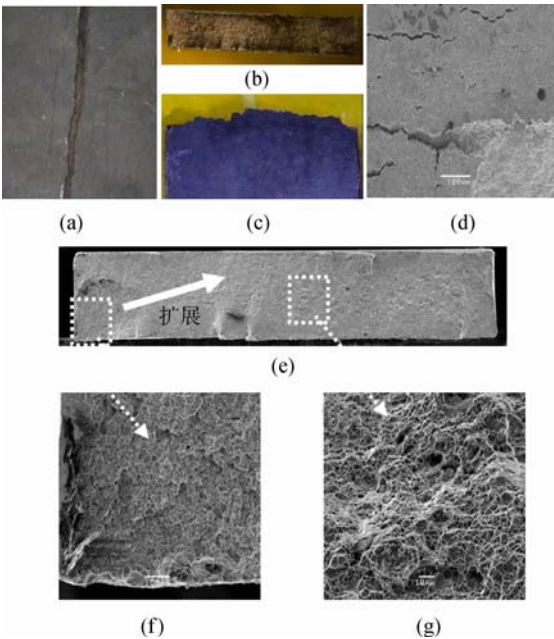


图 7 GH3128 试件 24-01 拉伸断裂云图
Fig.7 Mechanical contour of No. 24-01 GH3128 test-piece

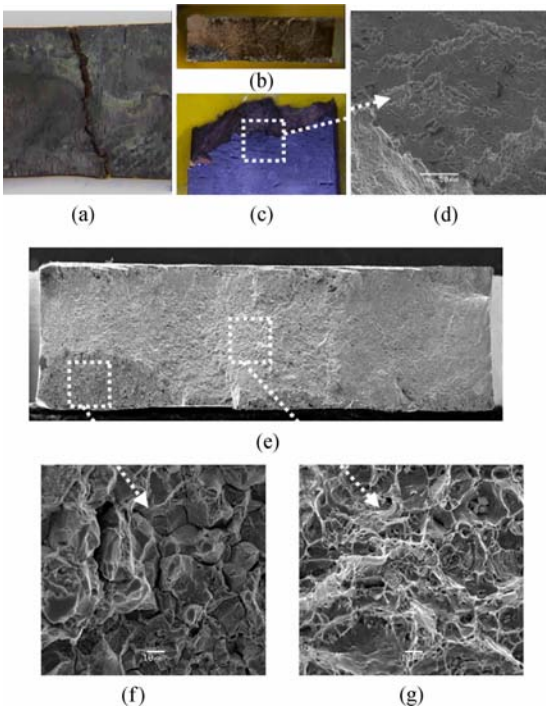


图 8 GH625 试件 22-03 拉伸断裂云图
Fig. 8 Mechanical contour of No. 22-03 GH625 test-piece

貌 (15×);(b)图和(c)图为断口正面、侧面体视镜形貌;(d)图和(e)图为断口侧面、正面扫描电子显微镜形貌;(f)图为裂纹源区显微形貌,呈冰糖状沿晶断裂形貌;(g)图为裂纹扩展区显微形貌,韧窝状穿晶断裂形貌.可以看出,合金断裂的主裂纹从试件表面开裂,这种表面开裂为沿晶脆性断裂,向试件内部扩展后转变为穿晶韧性断裂.可以看出,试件的断裂方式与标准试件基本一致,断裂均自表面萌生向内部扩展.

3 结 论

- 1) 吸热型碳氢燃料与高温合金联合加热时,当试件表面温度超过 850℃时,试件容易熔断,钝化试件的结焦量明显低于未钝化试件.
- 2) GH625 试件与 GH3128 试件在 450℃煤油中腐蚀后 600℃拉伸应力与塑性应力略下降,在500℃左右煤油中腐蚀后 700~850℃拉伸应力与塑性应力均有一定程度降低,排除异常样品强度降低幅度最大为 13%、塑性降低幅度最大为 60%.整体上来讲,经不同油温腐蚀后 GH625 试件与 GH3128 试件仍保证了一定的高温拉伸强度与塑性.

参考文献:

[1] Ebrahimi H B. An efficient two-dimensional engineering design code for scramjet combustor, nozzle, and plume analysis[R]. AIAA 91-0416, 1991.

[2] Vinogradov V, Kobigsky S, Petrov M. Experimental investigation of liquid carbon-hydrogen fuel combustion in channel at supersonic velocities[R]. AIAA 92-3429, 1992.

[3] Bonghi L, Dunlap M J, Owens M G, et al. Hydrogen piloted energy for supersonic combustion of liquid fuels[R]. AIAA 95-0730, 1995.

[4] Baurle R A, Gruber M R. A study of recessed cavity flow fields for supersonic combustion applications[R]. AIAA 98-0938, 1998.

[5] 陈建华, 卢钢, 张贵田, 等. 冷却环带喷注结构对煤油超临界液膜的影响研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 336-341.

CHEN Jianhua, LU Gang, ZHANG Guitian, et al. Investigation on the effects of injection structure on kerosene supercritical cooling film[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(2): 336-341. (in Chinese)

[6] 孙海云, 郭永胜, 方文军, 等. 吸热型碳氢燃料热安定性研究[J]. 浙江大学学报:理学版, 2004, 31(2): 167-170.

SUN Haiyun. GUO Yongsheng, FANG Wenjun, et al. Study on thermal stability of endothermic hydrocarbon fuel [J]. Journal of Zhejiang University: Science Edition, 2004, 31(2): 167-170. (in Chinese)

[7] 张春本,邓宏武,徐国强,等. 超临界压力下航空煤油 RP-3 焓值的测量及换热研究[J]. 航空动力学报,2010,25(2): 331-335.
ZHANG Chunben, DENG Hongwu, XU Guoqiang, et al. Enthalpy measurement and heat transfer investigation of RP-3 kerosene at supercritical pressure[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(2): 331-335. (in Chinese)

[8] 方文军,雷群芳,林瑞森,等. 碳氢燃料的蒸气压与气液平衡测定[J]. 浙江大学学报:理学版,2003,30(5):539-544.
FANG Wenjun, LEI Qunfang, LIN Ruisen, et al. Measurement of vapor pressure and vapor liquid equilibria of hydrocarbon fuel[J]. Journal of Zhejiang University: Science Edition, 2003, 30(5): 539-544. (in Chinese)

[9] 黄文,邓宏武,徐国强,等. U 型管内超临界压力航空煤油压降特性[J]. 航空动力学报,2011,26(3):582-587.
HUANG Wen, DENG Hongwu, XU Guoqiang, et al. Pressure drop characteristics of supercritical aviation kerosene in U-turn tube[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(3): 582-587. (in Chinese)

[10] DENG Hongwu, ZHANG Chunben, XU Guoqiang, et al. Density measurements of endothermic hydrocarbon fuel at sub-and super-critical conditions[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2011, 56(6): 2980-2986.

[11] ZHONG Fengquan, FAN Xuejun, YU Gong, et al. Heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2009, 23(3): 543-550.

[12] 郭永胜,何龙,蒋武,等. 吸热型碳氢燃料裂解催化剂结焦研究[J]. 燃料化学学报,2002,30(6):514-518.
GUO Yongsheng, HE Long, JIANG Wu, et al. Study of coke on zeo lites for endothermic fuel catalytic cracking [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2002, 30(6): 514-518. (in Chinese)

[13] 张香文,米镇涛,周震寰,等. 高能量密度燃料 HDF-1 与金属材料的相容性[J]. 推进技术,2002,23(2):161-163.
ZHANG Xiangwen, MI Zhentao, ZHOU Zhenhuan, et al. Compatibility of high density fuel (HDF-1) and metal material[J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(2): 161-163. (in Chinese)

[14] Yoon E M, Selvaraj L, Song C S, et al. High-temperature stabilizers for jet fuels and similar hydrocarbon mixtures: 1 comparative studies of hydrogen donors[J]. Energy and Fuels, 1996, 10(3): 806-811.

[15] 张香文,董飞,周震寰,等. 高密度燃料 HDF-1 与橡胶的相容性研究[J]. 燃料化学学报,2003,31(4):342-347.
ZHANG Xiangwen, DONG Fei, ZHOU Zhenhuan, et al. Study on compatibility of high-density fuel HDF-1 with rubbers[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2003, 31(4): 342-347. (in Chinese)

[16] 张波,王彬成,林瑞森,等. 吸热型碳氢燃料的热裂解及混合催化裂解性能[J]. 推进技术,2002,23(6):513-517.
ZHANG Bo, WANG Bincheng, LIN Ruisen, et al. Thermal cracking and catalytic cracking of endothermic hydrocarbon fuel on mixture catalyst [J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(6): 513-517. (in Chinese)

[17] 魏超,张忠利. 深空探测发动机热环境研究[J]. 航空动力学报,2010,25(5):1139-1144.
WEI Chao, ZHANG Zhongli. Investigation on thermal environment for deep-space-exploration liquid rocket engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(5): 1139-1144. (in Chinese)

[18] 梁春华. 高效能航空发动机先进风扇和压气机叶片综述 [J]. 航空发动机,2006,32(3):48-52.
LIANG Chunhua. Overview of advanced fan and compressor blade/vane in high performance aeroengine[J]. Aero-engine, 2006, 32(3): 48-52. (in Chinese)

(编辑:叶 青)