

燃烧加热型煤油加热器工作特性试验*

张建强, 钟 战, 丁 猛, 李清廉

(国防科技大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对冲压发动机地面试验应用需求,设计了基于燃气加热方式的煤油加热器,通过试验的方法研究了多个因素对其工作特性的影响规律。研究表明,该煤油加热器加热能力强,响应时间短,可在线制备超临界/裂解态煤油;其中,燃气温度、流量和煤油流量是影响煤油加热器工作特性的主要因素,通过控制燃气温度和流量可以大范围调节煤油温度,能满足冲压发动机不同试验工况的应用需求。

关键词:煤油加热器;超临界/裂解态煤油;冲压发动机

中图分类号:V416.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)04-0030-05

Experimental research on operation performance of kerosene heater based on combustion heating

ZHANG Jianqiang, ZHONG Zhan, DING Meng, LI Qinglian

(Science and Technology on Scramjet Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract:In order to satisfy the demand of ground tests of ramjet, a kerosene heater based on gas heating was designed, and tests were taken to do research on the influence of several factors on the operation performance. The results indicate that the kerosene heater has a strong ability of heating, less responding time, and it can produce supercritical/cracked kerosene online; the main factors that influence operation performance of kerosene heater are temperature, mass flow rate of gas, and mass flow rate of kerosene. The kerosene heater can accommodate temperature of kerosene in a large range through control of temperature and mass flow rate of gas. Then it can satisfy demand of different status of ramjet ground tests.

Key words: kerosene heater; supercritical/cracked kerosene; ramjet

随着飞行马赫数的增加,燃烧和气动热引起的冲压发动机热防护问题将显著起来。当马赫数超过6时,燃烧室内总温可达到近3000K,常规的材料在没有主动冷却的情况下将难以正常工作^[1]。采用机载碳氢燃料(如航空煤油)作为冷却剂的再生冷却技术是解决高超声速热防护的有效方式之一^[2]。发动机冷却通道内的压力通常超过冷却剂煤油的超临界压力(~2.2MPa),随着煤油温度的升高超过临界温度(~630K),煤油将从液态直接进入超临界态^[3],该过程中,煤油的物理性质如密度、粘性、比热、热导率都会发生很大的变化,超临界煤油具有类似液体的密度和类似气体的扩散能力等特点^[4]。温度继续升高至裂解温度(~800K)后,煤油发生裂解,组分也会发生变化。已有研究表明,超临界/裂解态煤油喷注特性、燃烧特性与燃烧组织方式与液态煤油有很大区别^[5-10],迫切需要对超临界/裂解态煤油的燃烧特性与燃烧组织方式进行深入研究。

在进行地面试验时,需要供应超临界/裂解态煤油,目前主要采用的是电加热器。中国科学院力学研究所研制的二级电加热煤油加热器的第一级加热器采用储热式电加热系统,采用加热带加热,可在10~15min内将0.8kg煤油在5.5MPa下加热至570K,第二级加热器通过在加热管两端连接直流电直接通电加热,煤油出口温度可达到950K以上,加热时间为1~2s^[9]。

基于对超临界/裂解态煤油喷注与燃烧特性深入研究的需求,本文提出了一种采用高温高压燃气加热煤油的新方案,该方案煤油流量和加热后温度大范围可调,容易控制,试验准备时间短,可在线使用。文中对多个影响煤油加热器工作特性的主要因素进行了试验研究。

1 煤油加热器工作原理

如图1所示,煤油加热器包括燃气发生器和换热室两部分,换热室由换热室壁和换热管组成。

* 收稿日期:2012-12-25

作者简介:张建强(1987—),男,山东泗水人,博士生,E-mail:nabiandesha@163.com;

李清廉(通信作者),男,教授,博士,E-mail:peakdreamer@163.com

燃气发生器用于制备高温高压燃气,燃气流经换热室时对换热管中的煤油进行加热。

该加热器采用逆流换热的工作方式,煤油与燃气的热交换包括三个过程:燃气与换热管外壁面的对流换热过程,换热管内、外壁面导热过程和换热管内壁面与煤油的对流换热过程。参照文献[11]介绍的换热器传热计算方法。

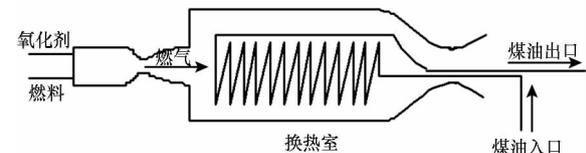


图1 煤油加热器结构示意图
Fig.1 Structure of kerosene heater

在换热面积一定的前提下,换热量与总传热系数、对数温差有关。在设计参数下,燃气流量 1kg/s,温度 1100K,煤油流量 0.37kg/s,三个过程的典型换热热阻分别为 $0.000662\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, $0.000122\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 和 $0.000173\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$,可见,燃气与外管壁的对流换热热阻是影响换热的主要因素。

2 试验结果及分析

2.1 试验系统

如图2所示,试验系统主要由煤油加热器,供应系统和测控系统组成。

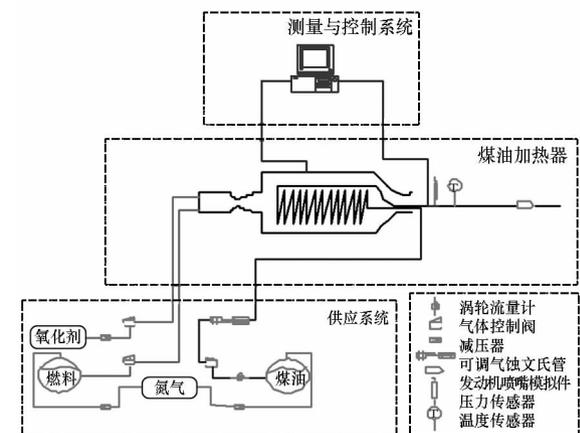


图2 煤油加热器试验系统示意图
Fig.2 Schematic diagram of test system of kerosene heater

换热管上游安装有涡轮流量计和文氏管用于测量和控制加热前液体煤油流量,下游安装有发动机喷嘴模拟件,加热后煤油的测温点和测压点位于发动机喷嘴模拟件前。

2.2 基本试验结果

图3和图4分别给出了典型试验工况1#和2#的发动机喷嘴模拟件前煤油压力和温度随时间

的变化曲线。其中 t 代表时间, P_{RP} 代表煤油压力, T_{RP} 代表煤油温度,下同。两工况下燃气和煤油参数均不同,二者试验结果截然不同,工况1#达到平衡,而工况2#未达到平衡。

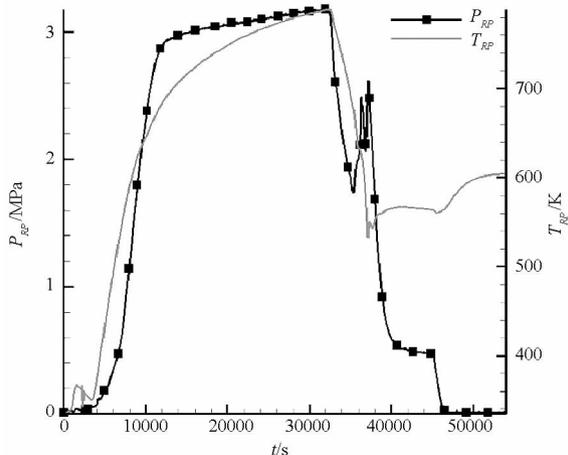


图3 1#煤油加热器试验曲线
Fig.3 1# test curves of kerosene heater

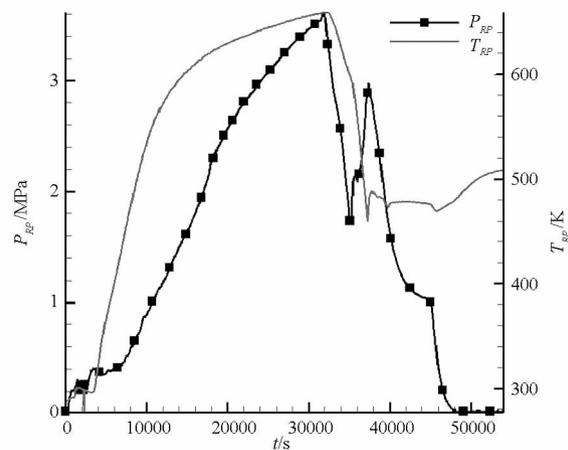


图4 2#煤油加热器试验曲线
Fig.4 2# test curves of kerosene heater

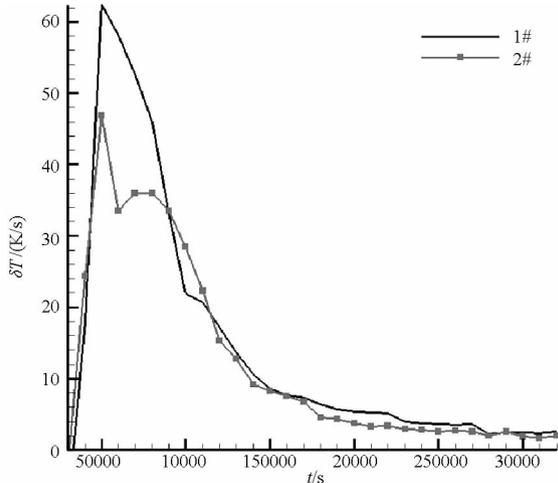


图5 1#/2#试验温升速率曲线
Fig.5 1#/2# test curves of rising speed of temperature

由图 3 试验曲线可以看出,燃气发生器约在 $t = 2\text{s}$ 时开机,其工作期间煤油压力和温度不断上升,在经历初始阶段非常迅速的上升后,温度和压力上升速率均逐渐减小并趋于平稳,大约 $t = 32\text{s}$ 时燃气发生器关机,煤油压力和温度迅速下降。图 5 给出了 1#试验煤油温度升高速率曲线,可见,燃气发生器工作 26s 时温升速率已小于 3K/s ,可以认为换热管两侧的煤油与燃气的换热过程已基本达到平衡;试验中测得的煤油压力平稳值约为 3.28MPa ,发动机喷嘴模拟件等效尺寸为直径 7mm ,单位面积流量约为 $9.61\text{g/m}^2/\text{s}$ 。参照文献 [6]测得的单位喉部面积超临界煤油流量随压力和温度的曲线图,可知温度为 790K ,压力 3.28MPa 对应的单位喉部面积流量约为 $9.56\text{g/m}^2/\text{s}$,同试验结果基本一致。因此,换热管在燃气发生器关机前已基本达到了质量和温度平衡。

由图 4 和图 5 可以看出,2#试验温度曲线变化趋势同 1#试验类似,燃气发生器工作 21s 时温升速率已小于 3K/s ,换热管两侧的煤油与燃气的换热过程基本达到平衡,但煤油压力持续上升,在燃气发生器工作结束时未能平稳。试验中发动机喷嘴模拟件等效尺寸为直径 5mm ,流动平衡时单

位面积流量为 $18.89\text{g/m}^2/\text{s}$,参照文献 [6]测得的单位喉部面积超临界煤油流量随压力和温度的曲线图,可知煤油温度为 660K ,试验中煤油的最高压力(约为 3.6MPa)对应的单位喉部面积流量约为 $13.74\text{g/m}^2/\text{s}$,小于 $18.89\text{g/m}^2/\text{s}$,说明此时换热管未达到质量平衡。试验中煤油温度为 660K ,约等于临界温度,煤油在喷嘴模拟件中加速的过程中温度和压力降低,由超临界态变成过压液态或者气态。文献 [10]测得的超临界煤油超声速稳定流动的工作区间,试验中煤油温度较低,在喷嘴模拟件中加速的过程中由超临界态变成过压液态,不能产生稳定的超声速流动,因此,压力一直升高而没有达到平稳。

2.3 各工况参数对加热器工作特性的影响

试验针对燃气压力、温度、流量和煤油压力、流量等工况参数对加热器工作性能的影响规律开展了试验研究,煤油出口温度是加热器加热能力的表征参数。煤油入口温度为常温,约为 290K ,各试验结果均已达到质量和温度平衡。试验结果见表 1,其中流量单位 kg/s ,温度单位 K ,压力单位 MPa ,时间单位 s 。

表 1 煤油加热器试验结果

Tab. 1 The test results of kerosene heater

试验 工况	燃气 流量	燃气 温度	煤油 流量	燃气 压力	煤油出口 压力	煤油入口 温度	燃气出口 温度	稳定 时间	煤油出口 温度
GK1	2.12	1081.3	0.399	1.526	2.745	302	940.15	27.3	798
GK2	2.096	1082.4	0.394	1.942	2.663	305	934.15	27.3	785.7
GK3	2.079	1161.6	0.294	2.342	3.155	310	999.75	19.3	882.6
GK4	2.09	1150.6	0.305	2.336	2.384	310	995.85	21.3	880.1
GK5	1.422	1161.6	0.304	1.527	2.706	311	971.15	27.3	778.6
GK6	1.41	1010.9	0.306	1.421	2.537	311	853.75	24.3	699
GK7	1.406	1083.5	0.305	1.469	2.599	311	888.15	24.3	716

通过更换不同的换热室喷管,可以在保持其他参数不变的前提下调节换热室内燃气压力,试验结果见表 1 中 GK1 和 GK2 的对比。改变燃气的压力,燃气速度随之改变,但雷诺数在流量不变的情况下不发生变化,见式(1)、(2),相应地,燃气侧对流换热系数不变,换热量就不会发生变化。

$$\nu = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{\dot{m} R_{\text{gas}} T_c}{PA} \quad (1)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{\dot{m} d}{\mu A} \quad (2)$$

通过更改下游音速喷嘴的节流尺寸,可以调节盘管内煤油压力。随着压力的变化,煤油物理性质诸如比热、密度、热导率和粘性系数会发生变

化,相应地,煤油与盘管对流换热情况发生变化,从而影响加热器的换热效果。针对煤油对工作特性的影响开展了试验,结果见表 1 中 GK3 和 GK4 的对比。由试验结果可知管内煤油压力对加热效果的影响很小。

综上由试验结果可知,改变换热室内燃气压力和盘管内煤油压力对于加热器的工作特性基本没有影响。因此研究其他工况参数对加热性能的影响时,可以不必要求燃气压力和煤油压力相等,在一定程度上简化了试验。

2.3.1 燃气流量

保证燃发器余氧系数不变,增大氧化剂和燃

料的流量,能够增大燃气流量而保持燃气温度不变。从而研究燃气流量对加热器工作特性的影响。试验结果见表1中GK5和GK4的对比。

增加燃气流量能够显著地增大燃气与管壁对流换热系数,从而使得总换热系数增大,换热效果增强,有效地提高煤油出口温度。

由试验结果可知,改变燃气流量对于加热器的工作特性影响较大。因此,增大燃气流量是提高加热器工作性能的有效途径。

2.3.2 燃气温度

保证燃发器总流量不变,增大氧化剂的流量,能够增大余氧系数而调节燃气温度。从而研究燃气温度对加热器工作特性的影响。试验结果见表1中GK6、GK7和GK5的对比。

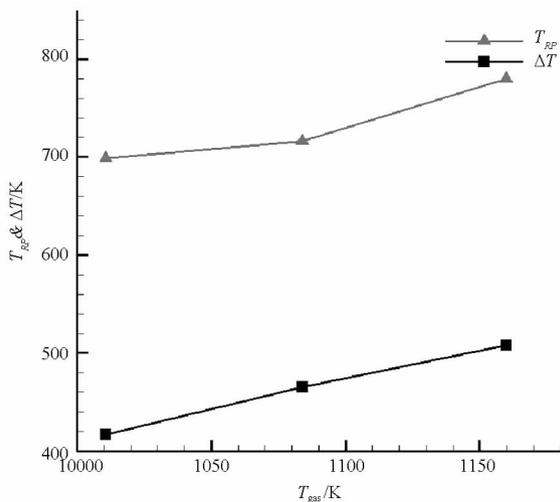


图6 对数温差/燃气侧对流换热系数 vs 燃气温度

Fig. 6 Logarithm difference in temperature/heat transfer coefficient of gas vs temperature of gas

图6为三种工况试验下对数温差对比图,其中 T_{gas} 代表燃气温度, ΔT 代表对数温差。三种工况下,保持燃气流量约为1.41kg/s,煤油流量0.305kg/s,燃气温度由1011K提高7.1%至1083K,对数温差由416.6K提高11.6%至464.9K,煤油出口温度由699K提高至716K,温升增幅为4.4%;温度由1011K调高14.9%至1162K,对数温差提高21.8%至507.6K,煤油出口温度提高至780K,温升增幅为20.9%。由此可见,提高燃气温度能够显著地提高对数温差,相应地增大换热量,从而提高煤油出口温度。

综上所述,随着燃气温度的提高,对数换热温差显著提高,换热量相应增大,煤油出口温度升高,虽然稳定时间随之变长,但其影响不大,相对于加热性能的显著提高是可以忽略的。因此可以通过提高燃气温度增强加热器的加热性能。

2.3.3 煤油流量

通过改变文氏管节流面积和入口压力可以改变煤油流量,保证其余参数不变,从而研究煤油流量对加热器工作特性的研究。试验结果见表1中GK4和GK2的对比。

两试验工况保持燃气流量约为2.09kg/s,燃气温度1100K,煤油流量分别为0.305kg/s和0.394kg/s,相应的煤油出口温度为880.1K、785.7K,吸热量比值为1:1.064。可见,随着煤油流量的增大,换热量增大,但是小于流量增大的速率,使得出口温度降低。

3 结论

本文设计了利用高温高压燃气加热煤油的煤油加热器,对几个主要因素对加热器工作特性的影响规律进行了试验研究。结果表明:

(1)经试验验证该煤油加热器设计方案可行,平衡时间小于28s,可在线制备超临界/裂解态煤油,能初步满足冲压发动机地面试验的需求;

(2)煤油流量、燃气温度和流量对煤油加热器工作特性均有显著影响,通过控制燃气温度和流量可以将常温下流量为300~400g/s的煤油加热至700~880K,满足冲压发动机不同工况的试验需求。

煤油高温结焦的预防和处理是加热器必须解决的问题。该加热器中煤油在换热管内温度不断升高,高温区域停留时间短,结焦影响较小;同时可以定期向换热管内通入空气,在高温条件下将结焦产物氧化,解决管路结焦问题。

参考文献 (References)

- [1] National Research Council. Review and evaluation of the air force hypersonic technology program [M]. Washington D C, National Academy Press, 1998.
- [2] Lander H, Nixon A C. Endothermic fuels for hypersonic vehicles[J]. Journal of Aircraft, 1971, 8(4): 200-207.
- [3] Yang V. Modeling of supercritical vaporization, mixing and combustion processes in liquid-fueled propulsion system[J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2000, 28: 925-942.
- [4] Tishkoff J M, Drummond J P, Edwards T. Future directions of supersonic combustion research: air force/NASA workshop on supersonic combustion [C]. 35th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, 1997.
- [5] Yu G, Fan X J, Li J G, et al. Characterization of a supersonic model combustor with partially-cracked kerosene [C]. AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Tucson, Arizona, 2005.
- [6] Fan X J, Yu G, Li J G. Investigation of vaporized kerosene injection and combustion in a supersonic model combustor[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(1): 103-110.

[7] Fan X J, Yu G, Li J G. Combustion and ignition of thermally cracked kerosene in supersonic model combustors[J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(2): 317-324.

[8] 范学军, 俞刚. 超临界煤油超声速燃烧特性实验. 推进技术[J], 2006, 27(1): 79-82.
FAN Xuejun, YU Gong. Experiments on supersonic combustion of supercritical kerosene[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(1): 79-82. (in Chinese)

[9] 范学军, 俞刚, 李建国. 超临界与热裂解煤油超声速燃烧性能优化研究[J]. 空气动力学学报, 2009(增刊): 77-83.
FAN Xuejun, YU Gong, LI Jianguo. Performance optimization for supersonic combustion of supercritical and cracked kerosene [J]. ACTA Aerodynamica Sinica, 2009 (supplement): 77-

83. (in Chinese)

[10] 仲峰泉, 范学军, 王晶. 超临界态煤油等熵流动和超声速喷注研究[C]. 第二届高超声速科技学术会议, 安徽黄山, 2009.
ZHONG Fengquan, FAN Xuejun, JING Wang. Characteristics of Isentropic Flow and Supersonic Injection of Supercritical Kerosene [C]. 2nd Hypersonic Science and Technology Conference, Anhui, Huangshan, 2009. (in Chinese)

[11] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)

(上接第 29 页)

[4] 李建勋, 柯熙政. 基于脉冲星定时模型的自主导航定位方法[J]. 中国科学(G 辑), 2009, 39(2): 311-317.
LI Jianxun, KE Xizheng. Study on autonomous navigation based on pulsar timing model [J]. Science in China Ser. G, 2009, 39(2): 311-317. (in Chinese)

[5] 苏哲, 许录平, 甘伟. 基于压缩感知的脉冲星轮廓构建算法[J]. 中国科学(G 辑), 2011, 41(5): 681-684.
SU Zhe, XU Luping, GAN Wei. Pulsar profile construction algorithm based on compressed sensing [J]. Science in China Ser. G, 2011, 41(5): 681-684. (in Chinese)

[6] 谢振华, 许录平, 倪广仁. 基于双谱的脉冲星累积脉冲轮廓时间延迟测量[J]. 物理学报, 2008, 57: 6683.
XIE Zhenhua, XU Luping, NI Guangren. Time off set

measurement algorithm based on bispectrum for pulsar integrated pulse profiles [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57: 6683. (in Chinese)

[7] 胡慧君, 赵宝升, 盛立志, 等. 用于脉冲星导航的 X 射线光子计数探测器研究[J]. 物理学报, 2012, 61(1): 019701-5.
HU Huijun, ZHAO Baosheng, SHENG Lizhi, et al. X-ray photon counting detector for x-ray pulsar-based navigation [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(1): 019701-5. (in Chinese)

[8] Mallet S, Zhong S. Characterization of signals from multiscale edges [J]. IEEE T Pattern Anal, 1992, 14(7): 710-732.

[9] Mallet S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets [J]. IEEE T Inform Theory, 1992, 38(2): 617-643.