

RP-3航空煤油裂解台架搭建及实验分析

钟涛, 郑东

西南交通大学机械工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2024年3月20日; 录用日期: 2024年4月23日; 发布日期: 2024年4月30日

摘要

本文设计并搭建了一套用于探究航空煤油RP-3裂解结焦的实验系统。详细地介绍了航空煤油裂解实验系统各个子系统的主要构成和主要功能。然后, 利用所搭建的航空煤油裂解实验系统测量了航空煤油在入口温度285°C、压力3 MPa、质量流量0.44 g/s条件下的裂解特性, 实验结果表明: 在上述条件下, 航空煤油的临界结焦功率为730 W; 其裂解过程中进出口前后压差随着加热功率逐渐增大; 同时产气速率随着功率增加逐渐增大, 且在结焦时由于管路堵塞会有下降的现象; 同时增加加热功率有助于航空煤油的裂解。

关键词

航空煤油, 裂解结焦, 产气速率

RP-3 Aviation Kerosene Cracking Bench Construction and Experimental Analysis

Tao Zhong, Dong Zheng

School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: Mar. 20th, 2024; accepted: Apr. 23rd, 2024; published: Apr. 30th, 2024

Abstract

An experimental system for exploring the cracking and coking of RP-3 aviation kerosene was designed and constructed. The main components and main functions of each subsystem of aviation kerosene cracking experimental system are introduced in detail. Then, the aviation kerosene cracking experimental system was used to measure the cracking characteristics of aviation kerosene at the inlet temperature of 285°C, pressure of 3 MPa, and mass flow rate of 0.44 g/s. The experimental results show that under the above conditions, the critical coking power of aviation kerosene is 730 W, the pressure difference between the inlet and outlet during the cracking process gradually increases with the heating power, the gas production rate gradually increases with the

increase of power, and there will be a decrease phenomenon due to pipeline blockage during coking; and the increase of heating power is conducive to the cracking of aviation kerosene.

Keywords

Aviation Kerosene, Lysis Coke, Gas Production Rate

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

随着冲压发动机的问世,高超声速飞行器的发展得到了普遍重视。高超声速飞行器发动机在工作过程中经历着高温高压等恶劣工作条件,其工作温度可达 2000 K 以上[1] [2],因此需要高效的热防护方式保证发动机的安全性。而使用航空煤油作为冷却剂的主动冷却技术是一种不错的选择,当航空煤油作为冷却剂时,其可以通过两种不同的热吸收作用来降低发动机的温度,一是通过物理热沉吸收热量,二是通过化学反应裂解吸热[3] [4]。当航空煤油在高温下发生裂解结焦反应会使得流动和传热现象变得非常复杂,这既增加了流动阻力,又导致了换热效率下降,严重时甚至堵塞管路,影响飞行安全[5] [6]。因此,研究航空煤油的结焦特性是很有必要的。

目前,国内已有研究者对 RP-3 的结焦特性进行了实验研究。姬[7]等采用电加热作为直管预热段的加热方式,管式加热炉作为加热系统的加热方式对螺旋管、直角弯管以及直管三种结构下的 RP-3 的热氧化结焦特性进行了实验,指出大曲率结构可能会降低结焦量。赵[8]等则没有对 RP-3 进行预热而是直接通过电加热的方式将 RP-3 加热至所需温度进行热裂解反应,研究了 S 型不锈钢管内 RP-3 的裂解与结焦过程。Pei [9]等采用预热器和管式加热炉联合的方式研究了最高出口温度为 450℃ 不同入口温度下 S 型管内 RP-3 的氧化结焦特性。黄文[10]等通过电极电加热的方式对 U 型管内的 RP-3 进行了压降特性的实验研究。张[11]等通过实验研究了竖直向上和竖直向下管内 RP-3 的换热特性,探讨了浮升力对 RP-3 结焦过程的影响。孙[12]等开展了歧管式微通道(MMC: manifold microchannel)内碳氢燃料超临界压力流动换热现象的数值模拟研究,讨论了不同歧管结构单元数量下冷却平板的换热效率与湍流场分布特征。

综上所述,针对典型航空煤油 RP-3 的研究主要集中在流动及传热特性、热氧化结焦等方面,而针对高温高压条件下的航空煤油的裂解结焦特性研究较少。因此,本文采用电加热作为实验段加热方式,管式加热炉作为蛇形预热段加热方式研究了 RP-3 在高温高压入口条件下 S 型管内的裂解结焦特性。

2. 方法

2.1. 实验系统

本文航空煤油 RP-3 裂解结焦实验系统主要由供油系统、预热系统、加热试验系统、冷却系统、测量系统组成,其示意图如图 1 所示,实物图如图 2 所示。其基本工作原理为:密封油箱内的航空煤油经过柱塞泵的抽取加压并经过脉冲阻尼器的稳压后,通过质量流量计达到预热段加热至指定入口温度;然后通过直流电源电加热的方式将实验段的航空煤油加热至指定的温度进行裂解实验,最后裂解产生的废油和气体经过冷凝管冷却后流入废油箱,并通过气袋采集裂解过程中的产气量。

供油系统主要由密封油箱、柱塞泵、单向阀、脉冲阻尼器、过滤器以及质量流量计以及背压阀组成。实验过程中的压力由柱塞泵和膜片式背压阀共同形成及维持, 其中柱塞泵最大供油量 9.5 kg/h, 精度为 1%; 背压阀压力承受范围 0~6 MPa, 精度 1%。柱塞泵由于其活塞往复运动的原因, 会对管内油压造成脉冲波动现象, 为了避免这种压力波动对实验结果造成的影响, 采用了隔膜式脉冲阻尼器来减弱这种压力波动, 隔膜式脉冲阻尼器工作压力为 2.1 MPa。同时采用 40 μm 孔隙通径的过滤器来过滤航空煤油中可能存在的微小杂质, 避免杂质堵塞质量流量计。

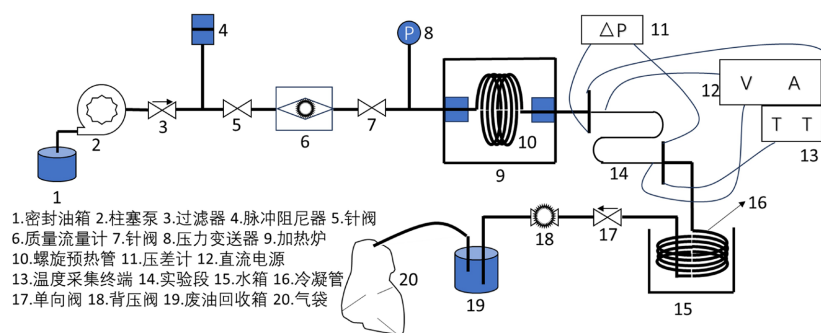


Figure 1. Schematic diagram of aviation kerosene pyrolysis bench

图 1. 航空煤油裂解台架示意图



Figure 2. Aviation kerosene pyrolysis bench

图 2. 航空煤油裂解台架实物图

预热系统主要由管式加热炉、螺旋蛇形弯管组成。管式加热炉使用电流焦耳效应产生热量, 其加热额定功率为 1800 W, 最大加热温度可达 900 $^{\circ}\text{C}$, 温度控制精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。预热段管件由外径 6 mm 厚度 1 mm 的螺旋状无缝钢管制成, 螺旋半径为 70 mm, 长度 30 cm。管式加热炉的进出口均采用耐火砖作为隔热保温材料, 维持腔内温度。采用螺旋状的预热段一方面可以减小整个系统的长度同时又可以增大航空煤油的换热效率。

加热系统主要包括 S 型实验段、直流电源、耐高温四通接头、陶瓷管以及卡套等。其中 S 型实验段由外径 3 mm 厚度 0.5 mm 的高温合金管制成, 直流电源最大输出功率可达 6000 W, 具有恒流或恒压两种输出模式, 耐高温四通接头主要用于安装测量进出口温度的热电偶以及压差管, 同时采用陶瓷管与卡套结合的方式避免实验中的触电风, 整个实验段以及四通接头、陶瓷管等均由保温棉包裹。

冷却系统主要由冷却水箱、螺旋冷却管以及过滤器组成。实验段出口的航空煤油温度可高达 600 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 而通常的背压阀以及其他配套设施最大限度温度为 200 $^{\circ}\text{C}$, 因此需要对煤油进行降温处理确保设

备安全。与预热段类似采用 6 mm 的螺旋蛇形弯管作为冷却管以增大空间利用率和换热效率。

测量系统主要对系统压力、进出口温度以及质量流量以及裂解过程中产气量进行测量。对于系统压力采用高精度的压力变送器进行测量, 其测量范围为 0~5 MPa, 测量精度为 0.5%。航空煤油进出口温度则采用 K 型热电偶进行测量, 其可测量 0℃~1300℃ 内的温度, 测量精度 1%。在测量煤油进出口温度时, 采用预埋式测量方法: 直接将热电偶测温头沉浸在煤油管路中, 利用卡套的方法保证管路的密封性, 这样既确保了测温准确性又不会影响煤油的流动状态。本文中采用科氏力质量流量计对航空煤油流量进行测量, 其可测量的最大质量流量为 4 kg/h, 测量精度为 0.5%。为了探究航空煤油裂解的产气特性, 使用 3 L 容积的压缩气袋对产气量进行测量, 并利用气袋总容积除以充满气袋的时间获得这段时间内的产气速率。

2.2. 实验工况

通过上述实验系统, 本文测量了基础航空煤油 RP-3 的裂解实验数据, 其具体试验工况见表 1 所示。

Table 1. Aviation kerosene cracking experimental conditions

表 1. 航空煤油裂解实验工况

工况	质量流量	压力	管式加热炉温度	预热温度	实验入口温度	加热功率
1	0.44 g/s	3.0 MPa	580℃	334℃	285℃	650 W~700 W~730 W

3. 结果与讨论

3.1. 临界结焦功率

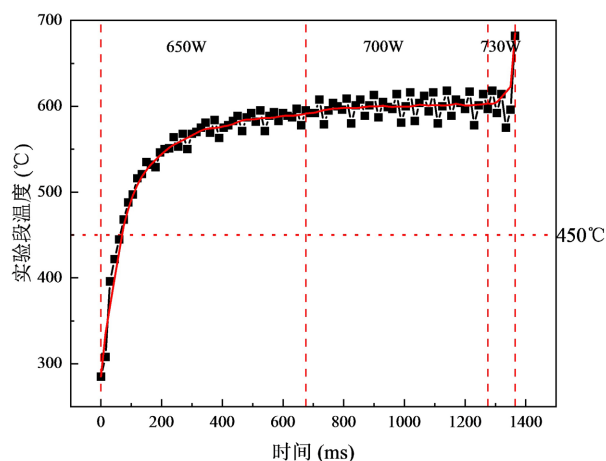


Figure 3. Relationship of jet fuel outlet temperature over time

图 3. 航空煤油出口温度随时间的变化

临界结焦功率可以看出航空煤油在此种环境下的吸收热量的能力。临界结焦功率越大, 说明其吸收热量效果更好, 更具备成为航空发动机冷却剂的前提, 实验中主要通过实验段出口温度的变化来确定其临界结焦功率。图 3 为实验测得的出口处航空煤油的温度随时间的变化图。一般来说, 当航空煤油温度大于 450℃ 时[13], 其就已经开始发生裂解结焦过程, 因此在图 3 中标出了这条温度线, 以便更好的分析航空煤油的结焦过程。当加热功率给定为 650 W 时, 航空煤油温度从 285℃ 升高至 450℃ 时用了 70 s 的时间, 在这一过程内航空煤油主要通过物理吸热的方式使得自身的温度快速上升。同时随着时间的推移, 在 650 W 持续时间内, 当航空煤油温度大于 450℃ 后, 其温度上升速率明显变缓, 这是由于航空煤油已

经开始初步的裂解反应产生大碳氢液体, 从而吸收的热量更多用于化学反应断键, 那么就会导致温度上升减缓。当继续增大加热功率至 700 W 并维持一定时间, 可以从图中发现, 在此功率下航空煤油温度升高同样缓慢, 这是由于此时航空煤油到达裂解最快速的时候, 更多的大碳氢液体分子吸收热量裂解为小分子液体和气体, 整个体系的温度增加就不明显。而当加热功率调整到 730 W 时, 航空煤油温度在短时间内急剧上升, 从 602℃ 增加到 682℃, 而其时间大约是 90 s。这是由于随着时间推移, 管内结焦固体物含量增多导致管子堵塞, 导致焦炭等产物直接物理吸热, 从而导致温度快速上升。

3.2. 进出口前后压差

进出口前后压差是由管内壁面的结构造成的, 而当航空煤油发生裂解反应后, 会形成许多结焦物附着于管内壁上, 从而改变管内的流动特性。通过检测进出口压差的变化可以知道航空煤油随加热功率的结焦特性变化关系。图 4 展示了实验段进出口压差随时间的变化关系。从图中可以看出, 当加热功率为 650 W 时, 在此功率持续时间内, 实验段进出口压差随着时间的推移其逐渐增加。由前面工况可知, 入口油温为 285℃, 此条件下的航空煤油处在氧化结焦阶段, 当航空煤油持续吸收热量温度升高后发生裂解反应, 沉积于管内壁的物质增多, 管内径变小, 导致进出口压差逐渐增大。而当继续增大加热功率后, 进出口前后压差持续增加, 说明当加热功率维持在 700 W 时, 航空煤油温度在 600℃ 左右时, 航空煤油的裂解率达到最大值。而当加热功率增加至 730 W 并维持一定时间后, 进出口前后压差突然加速上升, 说明此时管内径已经非常小, 前后流动阻力增大很多, 意味着管子即将发生堵塞, 说明 730 W 是本文试验工况下航空煤油的临近结焦功率。

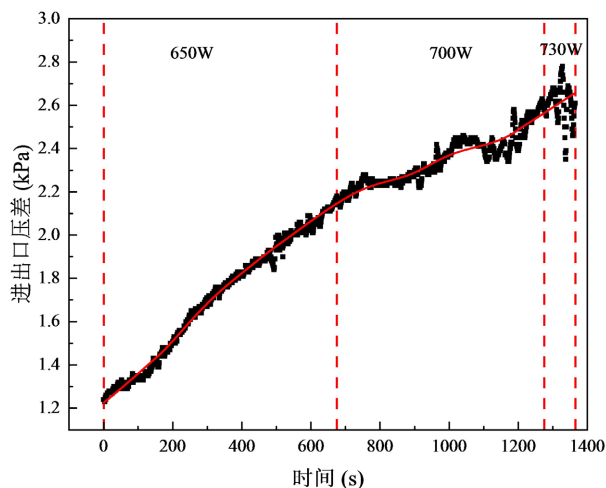


Figure 4. Relationship between the inlet and outlet pressure differentials over time

图 4. 进出口压差随时间变化关系

3.3. 产气速率

为了考察了航空煤油的裂解过程其气相产物的生成速率, 分析统计了其在裂解过程中的产气速率。如图 5 所示, 展示了航空煤油产气速率随时间的变化关系, 并划出了三个不同功率所对应的产气速率。从图中可以看出, 当加热功率为 650 W 时, 有相当长的一段时间内没有产气, 在这段时间内航空煤油主要进行物理吸热以及氧化结焦反应, 产生结焦前驱体, 但这并不代表没有化学热沉。而后随着加热功率的提高, 航空煤油裂解反应加快, 使得其产生了更多的气体, 这一点可以从产气速率的增加看出。当加

热功率靠近临界结焦功率时, 此时反应达到最大速度, 航空煤油的产气速率也达到了最大值, 管路内已经开始发生堵塞, 使得随着时间地推移, 产气率有所下降。

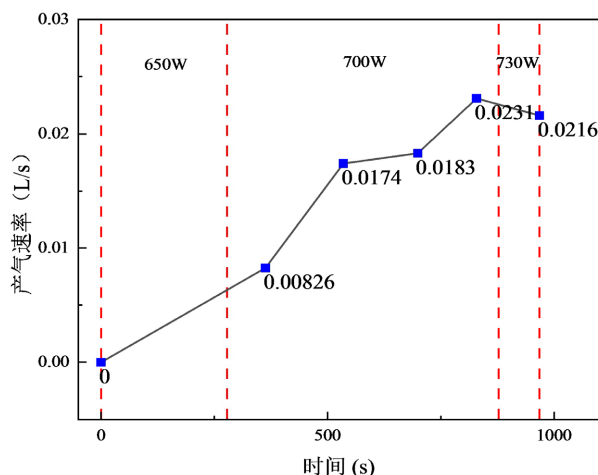


Figure 5. Gas production rate
图 5. 产气速率

4. 结论

本文设计并搭建了一套电加热方式加热用于测量 RP-3 航空煤油热裂解结焦的试验系统, 并对 RP-3 航空煤油在 S 型不锈钢管内的裂解与结焦过程进行了实验研究, 得到以下结论:

- 1) 在压力 3 MPa、实验入口温度 285 °C、航空煤油质量流量 0.44 g/s 时, 航空煤油的临界结焦功率在 730 W;
- 2) 随着加热功率的增加, 实验段进出口前后压差逐渐增大, 说明提高加热功率更有助于航空煤油的裂解;
- 3) 裂解过程中产气速率随着加热功率上升逐渐提高, 但在临界结焦时, 其产气速率会发生下降, 这是由于管路堵塞造成的。

参考文献

- [1] 杜昆, 陈麒好, 孟宪龙, 等. 陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用及热分析研究进展[J]. 推进技术, 2022(2): 107-125.
- [2] 章思龙, 秦江, 周伟星, 等. 高超声速推进再生冷却研究综述[J]. 推进技术, 2018, 39(10): 2177-2190. <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.2018.10.003>
- [3] Kuprowicz, N.J., Zabarnick, S., West, Z.J., et al. (2007) Use of Measured Species Class Concentrations with Chemical Kinetic Modeling for the Prediction of Autoxidation and Deposition of Jet Fuels. *Energy Fuels*, **21**, 530-544. <https://doi.org/10.1021/ef060391o>
- [4] 金烜, 沈赤兵, 吴先宇, 等. 超燃冲压发动机再生冷却技术研究进展[J]. 火箭推进, 2016, 42(5): 66-73.
- [5] Pu, H., Li, S., Dong, M., et al. (2019) Convective Heat Transfer and Flow Resistance Characteristics of Supercritical Pressure Hydrocarbon Fuel in a Horizontal Rectangular Mini-Channel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **108**, 39-53. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.06.002>
- [6] Wang, X., Song, Q., Wu, Y., et al. (2019) Modelling and Numerical Simulation of *n*-Heptane Pyrolysis Coking Characteristics in a Millimetre-Sized Tube Reactor. *Combustion and Flame*, **201**, 44-56. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.12.006>
- [7] 姬鹏飞. 典型管路 RP-3 航空煤油热氧化结焦沉积特性研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

- [8] 赵晋杰, 雷志良, 鲍泽威, 等. S 型管内超临界航空煤油的裂解与结焦研究[J]. 推进技术, 2021(3): 692-700. <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.190556>
- [9] Pei, X. and Hou, L. (2016) Secondary Flow and Oxidation Coking Deposition of Aviation Fuel. *Fuel*, **167**, 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.054>
- [10] 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. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.2011.03.037>
- [11] 张斌, 张春本, 邓宏武, 等. 超临界压力下碳氢燃料在竖直圆管内换热特性[J]. 航空动力学报, 2012, 27(3): 595-603. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.2012.03.019>
- [12] 孙星, 徐震, 景婷婷, 等. 歧管式通道内碳氢燃料超临界压力流动换热的数值模拟研究[J]. 空天技术, 2024(1): 1-9. <https://doi.org/10.16338/j.issn.2097-0714.20230015>
- [13] West, Z.J. (2011) Studies of Jet Fuel Autoxidation Chemistry: Catalytic Hydroperoxide Decomposition & High Heat Flux Effects. PhD Thesis, University of Dayton, Dayton.