

文章编号: 1000-8055(2009)09-1972-05

进口温度影响航空煤油结焦特性实验

王英杰, 徐国强, 邓宏武, 罗 翔, 王 勤
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院
航空发动机气动热力国家重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 实验研究了超临界压力下航空煤油 RP-3 的氧化结焦特性. 实验系统压力 5 MPa, RP-3 质量流速 4 g/s, 实验段为外径 2.2 mm、内径 1.8 mm 不锈钢管(材质: 1Cr18Ni9Ti). 通过改变进口温度 80, 100, 127 °C 和 150 °C, 研究了进口油温对 RP-3 氧化结焦的影响. 实验采用近似等热流加热方式, 管内壁面结焦通过称质法测量. 实验结果表明: 随进口温度的升高, 结焦速率峰值位置大都向上游推移, 且峰值高度有所增加; 管内结焦总量随进口油温的升高先增加, 当进口油温超过 127 °C 后, 管内结焦总量基本保持不变.

关 键 词: 结焦; 进口温度; 超临界压力; 冷却

中图分类号: V312+.1

文献标识码: A

Experimental study of influence of inlet temperature on aviation kerosene coking characteristics

WANG Ying-jie, XU Guo-qiang, DENG Hong-wu, LUO Xiang, WANG Qin
(National Key Laboratory on Aero-Engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Experiments were performed to study the influence of the inlet temperature on RP-3 coke deposition characteristics. The flowing RP-3 was stressed to 5 MPa, and heated up to 427 °C in a stainless steel tube (inner diameter 1.8 mm, outer diameter 2.2 mm, 1Cr18Ni9Ti) with constant heat flux. The inlet temperature was investigated at 80, 100, 127 °C and 150 °C. The amount of surface coke deposition was measured by weighing method. And the results show that, as RP-3 inlet temperature increases, coke deposition peaks shifts upstream and grows up slightly; the total amounts of coke deposition increase firstly and then maintains at a certain value when inlet temperature reaches 127 °C.

Key words: coking; inlet temperature; supercritical pressure; cooling

随着未来航空发动机的性能的不不断提升, 发动机高温部件冷却面临着巨大挑战. 在新型材料和涡轮内冷结构无法大幅改进的背景下, 用航空煤油作为冷源来提高冷却空气的品质成为一条有效新途径. 但当燃料吸热温度超过 175 °C 时, 会与其中的溶解氧发生氧化反应并生成结焦, 超过 480 °C 裂解结焦显著^[1]. 结焦的形成严重影响机组燃料系统的可靠运行, 导致换热设备传热效率

的大幅下降, 严重时有可能堵塞油路和喷嘴.

在航空发动机应用背景下, 燃料结焦主要遵循氧化结焦机理. 目前航空燃料从在进入燃烧室之前先对机载润滑系统、液压系统以及电子设备等进行冷却. 而发动机在不同飞行状态下的热负荷有很大差异, 燃料吸热后温度变化较大. 因此研究进口温度对换热管内结焦的影响对理解结焦的形成过程具有十分重要的意义. 然而以往国内研

收稿日期: 2009-03-29; 修订日期: 2009-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(50676005)

作者简介: 王英杰(1982-), 男, 山东郓城人, 博士生, 主要从事传热传质以及碳氢燃料氧化结焦研究.

究大都集中在热裂解结焦研究上,尽管国外针对热氧化结焦研究做了大量工作,但大都集中在氧质量分数^[2-3]、质量流速^[1,4]、压力^[4-5]及金属材料^[6]上,针对进口温度这一影响因素的研究鲜有报道。

为了丰富航空煤油 RP-3 氧化结焦机理,获取超临界 RP-3 结焦规律并为换热器的设计提供理论设计依据,本文通过改变 RP-3 进口温度 80, 100, 127 °C和 150 °C,实验研究了 5 MPa 压力 RP-3 的结焦规律。

1 实验部分

1.1 实验系统

实验在北京航空航天大学航空发动机气动热力国家重点实验室超临界燃料流动结焦实验台上进行,实验系统组成如图 1 所示。该实验台主要包括供油系统、加热系统、采样系统和冷却分离系统四部分。

实验原料 RP-3 由柱塞泵(3DP60/10)加压后输送至预热段。RP-3 首先在预热段中被加热至设定温度,然后进入实验段继续被加热至

427 °C 吸热后的高温 RP-3 由水-油冷却器冷却至常温然后流经一限压阀,阀后使用容器将 RP-3 收集。其中限压阀用来保持系统压力恒定在 5 MPa。RP-3 流量通过旁路进行调节,使用 DMF-1-2 型科氏力流量计测量数据。实验设定 RP-3 质量流量为 4 g/s,实验段管内驻留时间约为 1.5 s。根据计算物性进口 Re 约为 5000。为了确保实验管内洁净,实验开始前首先对实验段通油 15 min 进行冲洗。

预热段和实验段均为 1Cr18Ni9 Ti 不锈钢管(ϕ 2.2 mm $\times$ 0.2 mm),其中实验段长 2 m,预热段长约 2.5 m。使用管自身电阻对流经的 RP-3 进行加热,在距管进出口 5 cm 处各布置一铜电极,管外使用绝热材料有效保温。不锈钢管电阻分布均匀,该加热方式可认为近似等热流加热。RP-3 在实验段中被加热升温至 427 °C,历经超临界液态、拟临界状态到超临界气态的转变。沿实验段不等距布置 15 对 K 型热电偶测量管外壁温度,实验段进出口温度使用两支 ϕ 1.6 mm K 型铠装热电偶测量。所有热电偶使用前均经过标定。

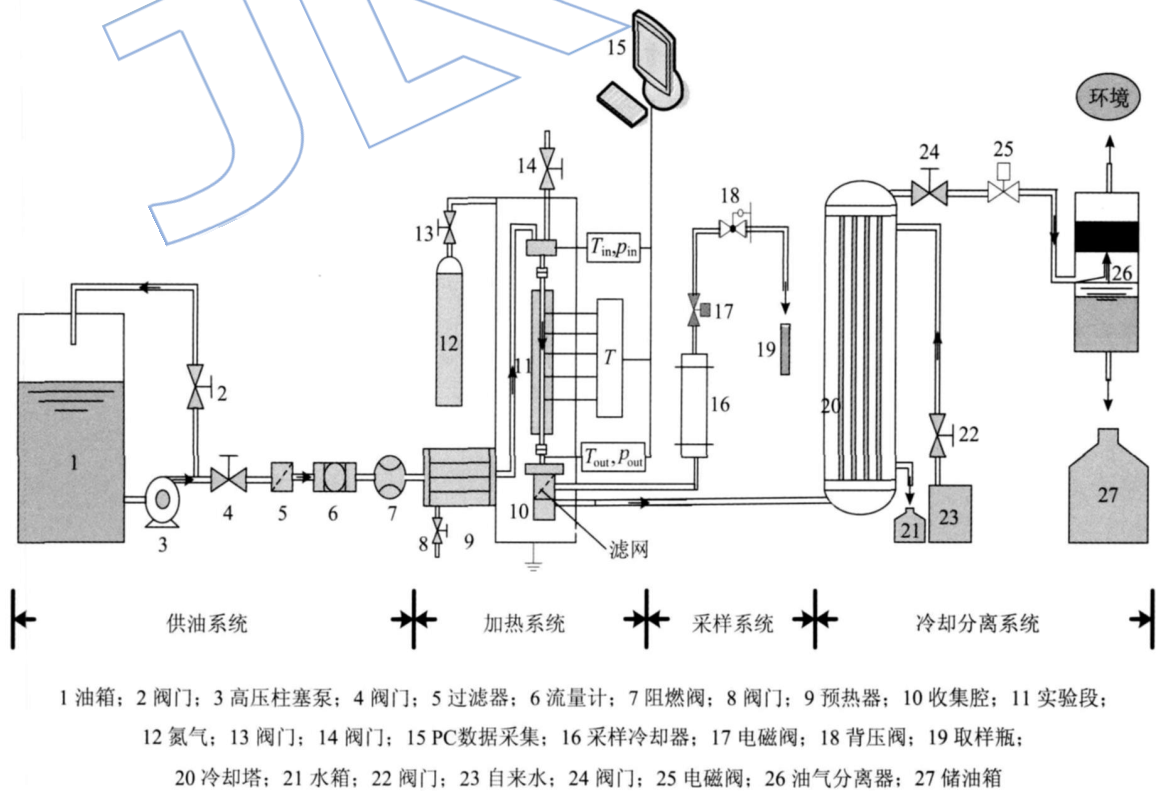


图 1 实验系统简图

Fig.1 Schematic of experimental system

1.2 测焦方法

结焦的准确测量历来是研究结焦规律的难题.在以往文献中普遍使用的测焦方法主要包括烧炭法^[7-8]、在线石英微量天平测量法^[9]和称质法^[1,10].烧炭法通过焚烧结焦生成物并使用色谱分析仪器对燃烧产物进行成份分析,测量生成物中碳的含量.该方法虽然测量精度较高,但处理步骤繁琐并且忽略了结焦中其它非碳类物质,对分析结焦影响换热规律产生不利影响.石英微量天平(MCB)虽然能够在线监测壁面结焦状况,但该类设备工作能力有限,最高工作温度一般不超过 270 °C,因此也不适用于本实验结焦测量.基于上述考虑,实验采用称质法对管壁结焦进行测量,本文在前人研究的基础上,总结出一套简便、可靠的测量方法.具体处理步骤如图 2 所示.

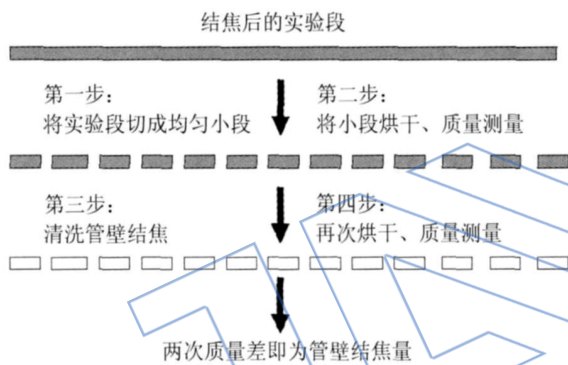


图 2 测量结焦的流程图

Fig. 2 Steps of coke weighing method

在结焦质量测量流程中,首先将实验壁面结焦管子切成 5 cm 长小段.在 80 °C 的环境下烘干 2 h 然后使用 0.1 mg 精度微量天平(赛多利斯 BT224S)第一次质量测量.然后使用碱性清洗液对每一小段超声波清洗 3 h,清洗完毕后使用无水乙醇将管内外冲洗干净.然后放入电炉中第二次烘干而后再次质量测量.通过对比诸小段清洗前后管壁质量变化获得管壁结焦分布.其中烘干和清洗的时间通过多次实验验证确定.该结焦测量方法具有良好的重复性.

2 实验结果和讨论

2.1 氧化结焦反应机理

图 3 是壁面结焦速率及管壁温沿管长的分布曲线.实验系统压力为 5 MPa,加热时长 1 h,RP-3 进口温度 127 °C,出口温度 427 °C,质量流量 4 g/s. RP-3 管壁结焦主要集中在实验管中后部,

并在 80~120 cm 处形成一显著结焦峰值区域,在实验管前半段结焦量很少.该分布规律与实验管壁面、管内流体温度以及 RP-3 溶解氧的质量分数的变化规律密切相关.碳氢燃料热氧化结焦是在碳氢分子与溶解氧的自氧化反应过程中产生的^[1].温度的升高会增大碳氢分子反应活性,造成燃料热氧化反应速率的上升.当燃料温度超过约 175 °C 时,碳氢分子与溶解氧发生反应生成自由基产物(结焦前体),自由基产物的生成引发和增强了其它自氧化反应并同时生成了结焦.这一反应机理在约 375 °C 之前一直处于主导地位.根据此机理,由于 RP-3 温度较低,在距离实验段进口约 40 cm 以内的前半段,结焦速率不足 2 μg/(min · cm²);在约 40 cm 以后,由于温度升高超过 175 °C,结焦速率明显上升,并且随着温度继续升高,增幅不断加快;但当作为反应物之一的溶解氧消耗到一定程度时^[1,11],结焦速率迅速降低(> 110 cm).温度和溶解氧综合作用从而导致了 80~110 cm 处出现一峰值区域.图 3 结焦分布规律与 Chin^[10]、范启明^[12]的研究结果大致相同.至于图 3 中结焦曲线呈现出的两峰值形状,可能是 RP-3 中某两种主要成分在不同温度下反应生成结焦导致的.此现象在同一批次 RP-3 其它工况实验中也同样出现.

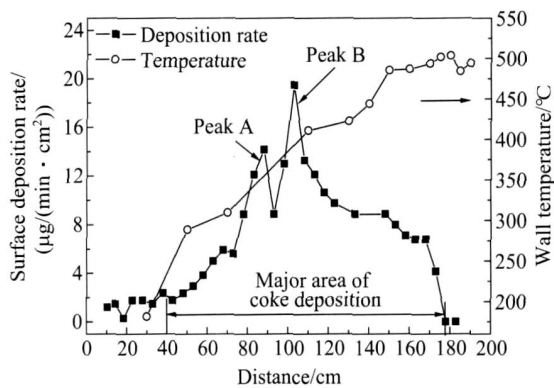


图 3 结焦速率及壁温分布曲线

($p = 5 \text{ MPa}$, $m = 4 \text{ g/s}$, $\tau = 1 \text{ h}$)

Fig. 3 Distribution of coke deposition rate and wall temperature

($p = 5 \text{ MPa}$, $m = 4 \text{ g/s}$, $\tau = 1 \text{ h}$)

2.2 进口油温对结焦特性的影响

根据上节所述氧化结焦机理,RP-3 氧化结焦的形成会受到诸多化学和物理因素的影响.而进口温度作为可能对管壁温度和管内油温分布产生显著影响的物理因素之一,其对管内壁结焦的影

响也同样十分明显. 本文通过改变进口温度80 , 100 ,127 °C和 150 °C,实验研究了其对 RP-3 结焦规律的影响. 实验系统压力 5 MPa ,实验时间 1 h , 出口温度保持 427 °C恒定. 实验结果如图 4 所示.

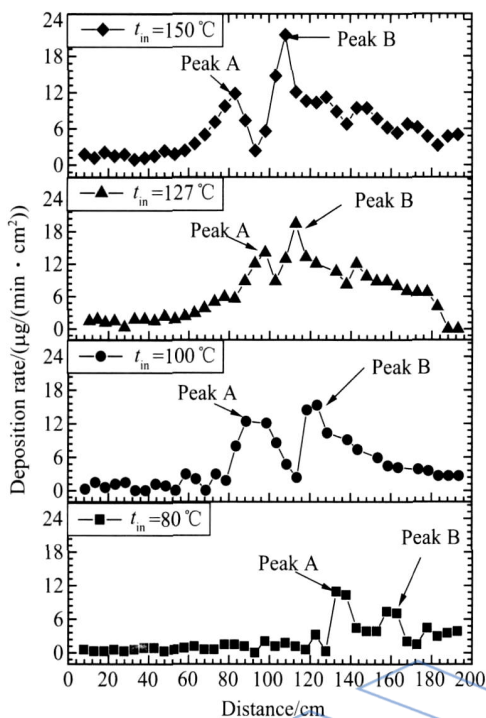


图 4 进口油温对 RP-3 管内结焦分布的影响
($m = 4 \text{ g/s}$, $p = 5 \text{ MPa}$, $\tau = 1 \text{ h}$, $t_{\text{out}} = 427 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig. 4 Influence of inlet temperature on RP-3 coke distribution
($m = 4 \text{ g/s}$, $p = 5 \text{ MPa}$, $\tau = 1 \text{ h}$, $t_{\text{out}} = 427 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

从图 4 不难看出,在氧化结焦机理的作用之下,不同进口温度下 RP-3 管内结焦分布曲线大致相似. 管内结焦主要集中在实验管中后部,结焦峰值大都出现在靠近实验管中部的位置,各工况结焦曲线均具有双峰的特征. 然而随着进口温度的升高,结焦峰值位置大致依次向上游推移,峰值高度也大都所有增加,具体数值见表 1.

在这一过程中,结焦峰值位置和高度变化的主要是由进口温度改变引起的. 尽管实验管加热热流密度也发生改变,近壁处二次流增强,液体空间结焦向壁面的输运效应更加显著. 但相对流体和壁面的温度,二次流对结焦生成的影响较弱. 在本文实验中,实验管壁温度和 RP-3 温度的变化主要受到进口温度改变的影响. 实验中 RP-3 进口温度改变远小于实验段进出口 RP-3 温度的升幅,实验段加热功率变化不大,实验加热热流密度变化并不显著,因此热流对管壁及 RP-3 温度分布的影响远小于进口温度.

由于实验保持出口温度 427 °C不变,进口温度的改变只对实验段中前部温度分布的影响十分显著,而对实验段出口处影响较小. 而结焦峰值一般出现在实验段中部偏后位置,对应管壁和 RP-3 温度变化较为明显. 随着管壁和 RP-3 温度的升高,RP-3 在更接近进口的位置开始发生氧化反应并在对应管壁上生成结焦,从而引起结焦峰值不断向前推移. 而结焦峰值高度随进口温度升高不断增加,很可能是 RP-3 在氧化结焦区域的驻留时间和 RP-3 在较高温度下氧化反应机理发生变化造成的. 实验中 RP-3 出口温度保持 427 °C恒定,进口温度的提升势必造成实验管轴向温度梯度的减小. 因此在进口温度较低的工况中,一方面 RP-3 在结焦峰值对应的温度区域驻留时间相对较短;另一方面在较高温度下 RP-3 和溶解氧的反应机理可能发生变化,各工况下 RP-3 结焦峰值基本出现在相同温度 (peak A 约 250~270 °C, peak B 约 300~310 °C, $t_{\text{in}} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况除外),而在相对此较高的温度下氧化反应机理发生变化,与先前反应有很大不同生成的结焦反而减少;两方面原因共同导致了低进口温度工况下结焦峰值偏小. 而对于 $t_{\text{in}} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况,其结果可能是因为 RP-3 在高温区停留时间过短低于结焦反应时间而引起的.

表 1 进口温度对 RP-3 结焦的影响
Table 1 Influences of inlet temperature on RP-3 coke deposition

进口温度/ °C	Peak A 位置/ cm	Peak A 结焦速率/ ($\mu\text{g}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$)	Peak B 位置/ cm	Peak B 结焦速率/ ($\mu\text{g}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$)
80	132. 75	10. 91	157. 75	7. 37
100	93. 5	12. 39	123. 5	15. 33
127	98	14. 15	113	19. 46
150	83	11. 79	108	21. 52

图5为RP-3进口温度对管内壁结焦总量的影响。随着管内温度的提升,结焦总量先逐渐增大,然后稳定在一固定值附近。这在很大程度上与RP-3在实验管结焦生成区域的驻留时间相关。进口温度的升高减小了管壁及RP-3沿轴向的温度梯度,扩大了管内RP-3结焦发生的区域,即延长了RP-3在管内结焦生成区域的驻留时间。因此RP-3与溶解氧有更充足的时间发生反应生成结焦,同时也大大增加了液体空间结焦扩散并粘附到壁面上的概率,管壁的结焦不断增多。但当进口温度增大到一定程度后($> 127^{\circ}\text{C}$),管内结焦总量不再继续增加。这可能是当RP-3在结焦生成区域的驻留时间延长到一定程度时,充分满足了其与溶解氧之间完全反应以及液体空间结焦向壁面的扩散并粘附。因此继续延长高温段RP-3驻留时间对结焦总量的影响不再明显。

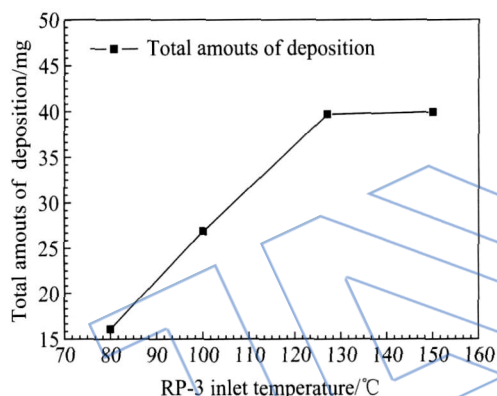


图5 进口油温对结焦总量的影响

($p = 5 \text{ MPa}$, $\tau = 1 \text{ h}$, $t_{\text{out}} = 427^{\circ}\text{C}$)

Fig. 5 Influence of inlet temperature on total amounts of coke deposition

($p = 5 \text{ MPa}$, $\tau = 1 \text{ h}$, $t_{\text{out}} = 427^{\circ}\text{C}$)

结焦的形成对管内换热的影响十分显著,换热设备的设计应综合考虑进口温度对结焦的影响。选用合适的进口温度有助于提高换热设备的效率及寿命。

3 结 论

使用超临界碳氢燃料流动结焦实验台研究了进口温度对RP-3管内结焦生成影响。实验结果表明:

- 1) 温度与溶解氧对RP-3的结焦产生综合影响,RP-3结焦速率沿管长随温度的升高先增大后下降,在实验段中后部形成结焦速率峰值;
- 2) 进口温度对管内RP-3壁面结焦有显著影

响,随着进口温度的升高,结焦峰值逐渐向前推移,结焦峰值逐渐增加;

- 3) 在实验范围内,实验管内壁结焦总量随进口油温的上升首先不断增加,但当进口油温超过 127°C 时,结焦总量基本保持不变。

参考文献:

- [1] Spadaccini L J, Sobel D R, Huang H. Deposit formation and mitigation in aircraft fuels[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123: 741-746.
- [2] Ervin J S, Williams T F. Dissolved oxygen concentration and jet fuel deposition[J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1996, 35: 899-904.
- [3] Zabarnick S, Zelesnik P, Grinstead R R. Jet fuel deposition and oxidation: dilution, materials, oxygen, and temperature effects[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1996, 118: 271-277.
- [4] Hazlett R N. Thermal oxidation stability of aviation turbine fuels[M]. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1991.
- [5] 刘德彰, 吴晓. 煤油结焦的抑制方法研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1993, 25(6): 767-771.
LIU Dezhang, WU Xiao. The experimental investigation on the suppression method of kerosene coking property[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1993, 25(6): 767-771. (in Chinese)
- [6] Altin O, Eser S. Analysis of solid deposition from thermal stressing of a JP-8 fuel on different tube surfaces in a flow reactor[J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2001, 40: 596-603.
- [7] Alexander V, Oierre J M, Brian A K. Determination of coking rate in jet fuel[J]. Combustion Science and Technology, 1981, 26: 171-175.
- [8] Heneghan S P. Static tests of jet fuel thermal and oxidative stability[J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9(1): 5-9.
- [9] Klavetter E A, Martin S J, Wessendorf K O. Monitoring jet fuel thermal stability using a quartz crystal microbalance[J]. Energy and Fuels, 1993, 7(5): 582-588.
- [10] Chin J S, Lefebvre S H, Sun F T-Y. Temperature effects on fuel thermal stability[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1992, 114: 353-358.
- [11] Edwards T, Zabarnick S. Supercritical fuel deposition mechanisms[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1993, 32(12): 3117-3122.
- [12] 范启明, 米镇涛, 于燕, 等. 高超音速推进用吸热型烃类燃料的热稳定性研究[J]. 燃料化学学报, 2002, 30(1): 78-82.
FAN Qiming, MI Zhentao, YU Yan, et al. Study on thermal stability of endothermic hydrocarbon fuels for hypersonic propulsion[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2002, 30(1): 78-82. (in Chinese)