

文章编号:1000-8055(2011)06-1341-05

流动方式对航空煤油 RP-3 结焦的影响

吴 瀚, 邓宏武, 徐国强, 琚印超, 孙纪宁

(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级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 实验研究了航空煤油 RP-3 在不同流动方式下的结焦分布情况. 实验中采用恒定热流的方式将流经单通道不锈钢管中的溶解氧饱和的航空煤油由 127 °C 加热到 427 °C, 系统压力 5 MPa, 质量流量 780 kg/(m² · s), 并利用“称质法”获得煤油结焦数据. 实验结果表明, 不同流动方式下, 结焦速率随着温度升高先增大后减小, 存在峰值区域; 虽然结焦速率峰值点出现对应的外壁温不同, 但是结焦速率分布曲线相似, 呈现单波峰形态; 结焦总量大体相当; 重力的影响体现在结焦峰值位置的偏移上.

关 键 词: RP-3; 热氧化; 流动方式; 结焦速率; 峰值位置

中图分类号: V312

文献标志码: A

Effects of flow orientations on the coking characteristic of jet fuel RP-3

WU Han, DENG Hong-wu, XU Guo-qiang,
JU Yin-chao, SUN Ji-ning

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China)

Abstract: In order to investigate the effects of flow orientations on surface coke deposition of oxygen-saturation RP-3 fuel flowing through a single-channel heated stainless-steel tubes. The system pressure was 5 MPa and the mass flow rate was 780 kg/(m² · s). Experiments were conducted for different tube orientations, namely: horizontal, vertical with flow from bottom to top and vice versa. High outlet temperature and high pressure were utilized to simulate actual working conditions. The amount of surface coke deposition was obtained by weighting method. The results show that, the deposition initially increases and then decreases with fuel temperature under different flow orientations, and the location of coking peak value moves by gravity along the experimental segment, but the shapes of surface coke deposition distribution curve are similar, and total deposition is the same.

Key words: RP-3; thermal oxidation; flow orientation; coke rates; peak position

现代航空发动机设计为进一步达到高性能需求, 将提高发动机的涡轮前温度和压气机增压比作为主要途径. 这两项措施一方面大大加重了高

温部件的冷却任务, 另一方面导致了压气机出口用于冷却热端部件的气体温度过高, 给热端部件的可靠运行带来了极大的不利. 使用航空燃料对

收稿日期: 2010-05-25; 修订日期: 2010-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(50676005); 中央高校基本科研业务费专项资金(YWF-10-02-043)

作者简介: 吴瀚(1988—), 男, 江西贵溪人, 硕士生, 主要从事超临界燃料结焦方面研究.

冷却空气进行冷却,可有效提高冷却空气品质,增强热端部件的冷却效果;并且燃料吸收多余热量达超临界状态可以提高燃料的雾化和燃烧性能,有助于航空发动机燃烧室结构优化,缩短燃烧室长度。

航空煤油在输运过程中如温度超过 150°C 时,燃料与其中的溶解氧将产生一系列化学反应。煤油中大分子碳氢组分可通过自由基链式反应形成氢过氧化物^[1]。随着反应的加深,该复杂化学过程的产物经聚合、缩合、凝结将形成胶状固体沉积物。上述固体沉积物在管壁不断堆叠,致使燃料流动通道减小,热阻增大,降低换热效率,严重者将堵塞喷嘴引发事故。

Spadaccini 等^[2]研究了物理因素对煤油结焦的影响,所得结论印证物理因素主要通过传质和反应动力学对结焦产生作用,其中油温对结焦的影响最为重要,压力、重力等因素的影响效果相对较小。Jones 等^[3]研究了燃料 JetA 在单管换热器中的氧化结焦,通过对竖直向上管、竖直向下管及水平管实验研究,得到了在低流速情况下,浮升力与重力对结焦的影响可以忽略的结论,但其实验研究的温度范围在 185°C 左右。而 Katta 等^[4]在研究浮升力对于燃料溶解氧的消耗影响时发现,在流速 16 mL/min 情况下,水平管的溶解氧消耗最少、竖直向下流动管的溶解氧消耗最多。

本文结合国内外已有的研究结果,在超临界碳氢燃料流动结焦实验台上开展相关研究,考察了航空煤油 RP-3 从 127°C 近似等热流加热至 427°C 过程中,不同流动方式对于管壁结焦沉积情况的影响。

1 实验部分

1.1 实验装置及方案

图1为超临界流动结焦测试实验系统简化图。实验装置由储供油系统、加热系统、冷却系统及数据测试采集系统组成。实验采用交流低电压大电流恒定热流的方式加热不锈钢实验段(管长 $L=2000\text{ mm}$,内径 $D_{\text{in}}=1.8\text{ mm}$,外径 $D_{\text{out}}=2.2\text{ mm}$)。管外包裹 Aspen 绝热材料,其导热系数为 $0.012\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。沿着加热管长方向不等距布置了15对直径为 0.1 mm 的标准 K 型热电偶监测壁温,测量精度为 $\pm 0.5\%$ 。进出口油温采用已标定的直径为 1 mm 的 K 型铠装热电偶测量,测量精度为 $\pm 0.6\%$ 。绝对压力由 CJY-113 压力传感器监测,测量精度为 $\pm 0.2\%$ 。实验段进出口压差采用 ROSEMOUNT-3051C 差压传感器监测,测量精度为 $\pm 0.15\%$ 。预热段前安装 DMF-1-2 型科氏力质量流量计测量质量流量,测量精度为 $\pm 0.3\%$ 。温度、压力和流量信号经 ADAM-4018 模块转换成模拟信号后输入电脑并实时记录。

实验中保证实验段进口油温为 127°C ,出口油温为 427°C ,系统压力为 5 MPa ,质量通量为 $780\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$,实验加热时间为 60 min ,加热热流密度为 190 kW/m^2 ,以进出口平均温度求得燃料在管内的驻留时间为 1.4 s 。实验段采用同批次加工的不锈钢管,假定其内表面粗糙度一样。

实验研究了竖直管从上往下流动的壁面结焦情况后,通过改变预热段的形状,从原来的“1”字形为“ Ω ”形,实现对实验段中煤油流动方向的改变,进而研究了竖直向上管流动、水平管流动情况

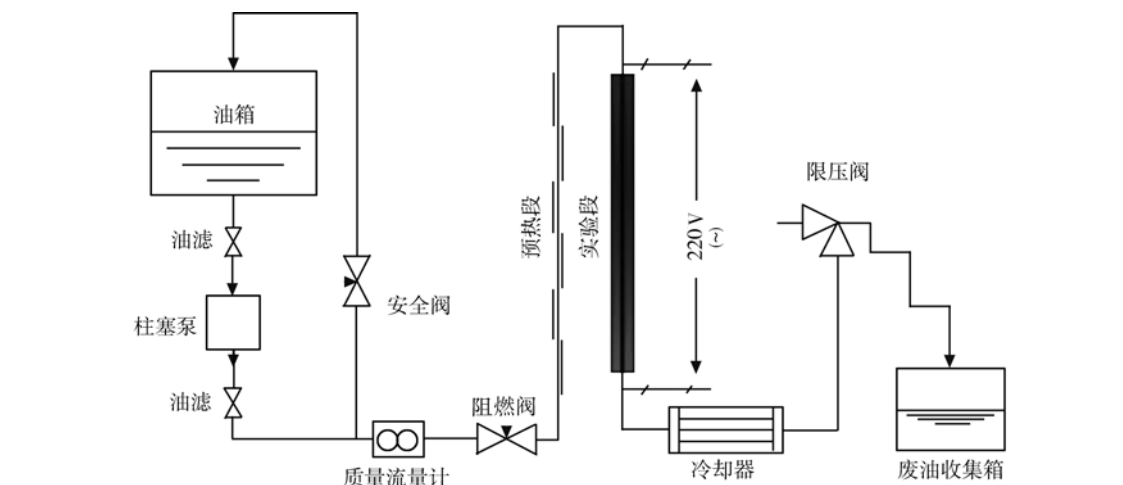


图1 实验系统简化图

Fig. 1 Schematic of the supercritical fluid system

下的壁面结焦。

1.2 实验原料

本实验所采用的航空煤油 RP-3 以直链烷烃和环烷烃为主,其主要物性参数如表 1 所示^[5]。实验前向煤油中通 3~5 h 空气,以保证其中溶解氧达到饱和,从而减少因溶解氧质量分数不同而带来的实验不确定性。

表 1 RP-3 主要物性
Table 1 Properties of RP-3

物性参数	数值
碳数分布	C10~C15
15℃时的密度/(g·cm ⁻³)	0.775~0.830
临界温度/℃	372.35
临界压力/MPa	2.39
5 MPa 时的裂解温度/℃	471.8

1.3 测焦方法

测量结焦方式主要包括了烧炭法^[6-7]、称质法^[8]和在线石英微量天平^[9]。烧炭法通过对结焦生成物焚烧并使用色谱对燃烧产物进行分析,该方法虽然测量精度相对较高,但处理步骤繁琐并且无法得到结焦中非碳类物质的含量。在线石英微量天平虽然能够在线监测壁面结焦状况,但设备工作温度不能超过 270℃。故本实验采用称质法测量结焦质量,测量结焦采用测量精度为 0.1 mg 的电子天平。实验后待处理的管子被切成 5 cm 长的小管段。用酒精擦拭管外壁后在 120℃ 的电炉中烘烤 1 h,取出,第一次测量质量。继而将小管段置于加入了弱碱性清洗剂的超声波清洗机中清洗,3 h 后取出再次烘烤 1 h,接着用酒精擦拭小管段外壁并第二次测量质量。通过对比清洗前后管段质量变化获得管壁结焦分布情况。

2 数据结果与讨论

2.1 数据处理

本实验主要是通过对实验段各段平均结焦速率分布曲线以及其结焦总量的比对,得到不同流动方式下的 RP-3 管壁氧化结焦的特性。

平均结焦速率是指单位时间、单位面积上的结焦量,其单位为 $\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 。结焦速率分布曲线上每个数据点的纵坐标为每小段的结焦速率,横坐标为每小段在实验段中的轴向位置,由所有这些点连接得到分布曲线。总结焦量是指所有

小段所测得的结焦量总和,其单位为 mg。

2.2 结果讨论

实验研究不同流动对于 RP-3 管内结焦生成及分布规律的影响。实验结果如图 2 所示,竖直向上流动实验中结焦峰值出现在更靠近上游的位置(88 cm 处),其次是水平流动(94 cm 处),最后是竖直向下流动(100 cm 处)。

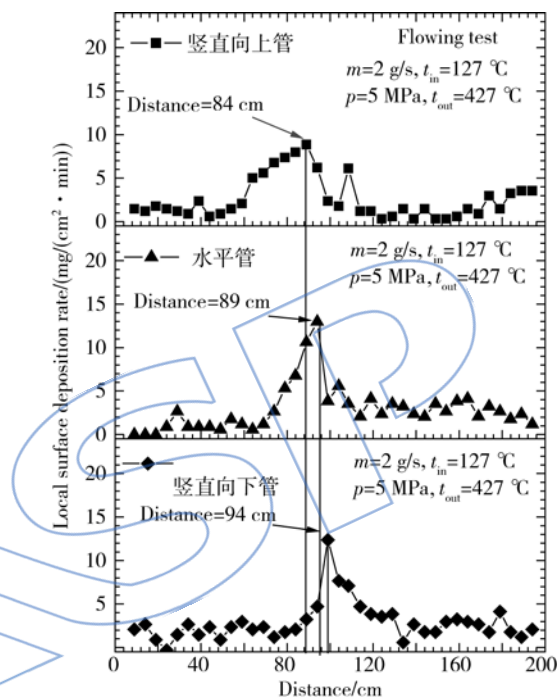


图 2 不同流动方式下的结焦速率对比曲线

Fig. 2 Contrast curve of cock rate in different flow orientations

如图 2 所示,不同流动状态下结焦速率沿管长总是先增大后减小,结焦峰值区域分布在管长的 80~120 cm 范围内,具体位置受重力、温度和氧浓度综合影响的结果。Marteney 等^[10]研究飞行器燃料的沉积形式和缓解,认为燃料温度是氧化结焦的主要原因,在约 316℃(600°F)的时候氧化造成的氧化结焦接近顶峰,超过该值后伴随氧的消耗殆尽而开始下降。实验中结焦速率峰值点对应的外壁温不同,最低是竖直向上管的 321℃,最高是竖直向下管的 342℃,而水平管介于两者之间。

在竖直向上流动中,重力作用方向与 RP-3 流动方向相反(见图 3),结焦前体或者结焦微团在重力作用下速度减小,大大低于 RP-3 流体质量平均速度。其被输送至壁面的可能性大大增加,因此结焦峰值出现在靠近上游的位置。在竖直向

下流动中,重力作用完全相反,结焦前体或者结焦微团被加速,更容易被输送至下游区域,结焦峰值出现在相对下游的位置.在水平流动中重力作用介于竖直向上和竖直向下两者之间,因此结焦峰值位置也处于两者之间.

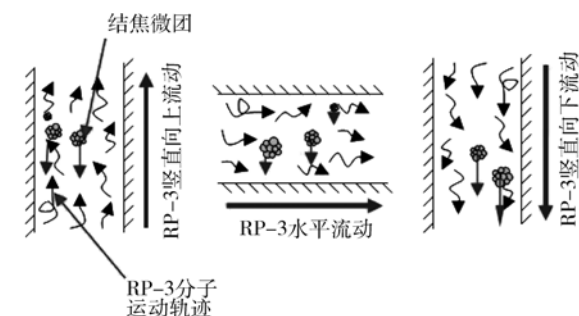


图3 重力对管内结焦微团作用示意图

Fig. 3 Effects of gravity on coke micromass in tubes

同时,可以看出在竖直向上管中,结焦速率峰值区域范围略大,峰值点的结焦速率较低.在水平管与竖直向下管中,结焦速率峰值区域范围略小,峰值点的结焦速率较高,但总体上来说,不同流动方式下的管壁结焦速率分布曲线基本相似.

如图4所示,三种流动方式下管内结焦总量相差不超过2.1 mg.流动方式对实验管内RP-3结焦总量并没有显著影响,这与管内氧化结焦进程有很直接的关系.从图2中可以看出,结焦主要发生区域(结焦峰值)大都在实验段中前部,而在实验段进出口处结焦水平大致相当并且可以忽略,说明三组实验中RP-3氧化结焦已经反应完全.由于质量流速相同,其他反应条件一致,三组实验结焦产量基本相同.因此可以得到,重力仅仅

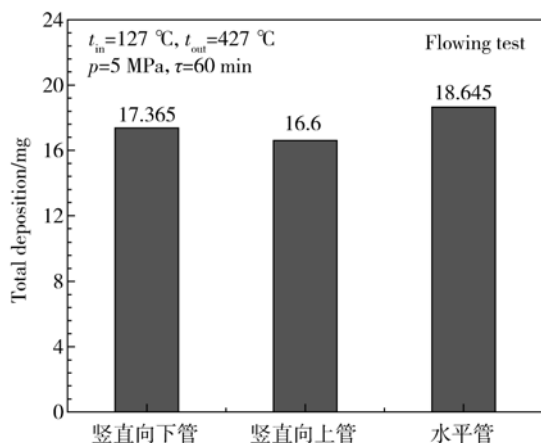


图4 不同流动方式下的结焦总量对比曲线

Fig. 4 Total coke mass of different flow orientations

影响了结焦主要发生区域的位置,但对结焦总量并无明显影响.即使流动方式不同,溶解氧完全消耗所对应的主流油温不同^[11],但在实验段出口之前,燃料中溶解氧已完全消耗,与燃料反应生成结焦前体并最终形成结焦沉积于管壁,从而保证了结焦总量的一致性.Krazinski等^[12]和Katta等^[4]也分别在其文献中提到了关于管壁结焦的化学反应动力学模型,认为氧消耗主要是单一不可逆反应:燃料+氧气→结焦前体,这个反应式主要是由Arrhenius表述和零阶反应决定的.在保证了进出口油温,系统压力,燃料质量通量相同及溶解氧均饱和的前提下,仅改变流动方式,对于结焦总量几乎没有影响.

3 结 论

本文针对未来先进航空发动机燃油系统的工作情况,在保证质量流速,进出口温度与压力等系统条件相同的情况下研究了不同流动方式对RP-3氧化结焦生成规律的影响.在本实验研究范围内,其结果如下:

- 1) 不同流动方式下,结焦速率峰值随着温度升高非线性增加,总是先增大后减小,存在一个显著的结焦峰值区域.
- 2) 不同流动方式下峰值点出现的外壁温不同,竖直向上管最低(321 °C),竖直向下管最高(342 °C),水平管介于两者之间.主要是由于重力产生的效应对结焦前体颗粒向金属壁面输运作用有所影响.
- 3) 不同流动方式下,结焦总量基本相当.

参考文献:

- [1] Edwards T, Harrison B, Zabarnick S, et al. Update on the development of JP-8+100[R]. AIAA 2004-3886, 2004.
- [2] Spadaccini L J, Sobel D R, Huang H. Deposit formation and mitigation in aircraft fuels[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123(4): 741-746.
- [3] Jones E G, Balster W J, Post M E. Degradation of a jet-fuel in a single-pass heat exchanger[R]. ASME 93-GT-334, 1993.
- [4] Katta V R, Jones E G, Roquemore W M. Development of global-chemistry model for jet-fuel thermal stability based on observations from static and flowing experiments[R]. AGARD CP-536, 1993.
- [5] 孙青梅,米镇涛,张香文.吸热型碳氢燃料RP-3仿JP-7临界性质(t_c , p_c)的测定[J].燃料化学学报, 2006, 34(4): 466-470. SUN Qingmei, MI Zhentao, ZHANG Xiangwen. Determination of critical properties (t_c , p_c) of endothermic hydro-

- carbon fuels—RP-3 and simulated JP-7[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2006, 34(4): 466-470. (in Chinese)
- [6] Vranos A, Marteney P J, Knight B A. Determination of coking rate in jet fuel[J]. *Combustion Science and Technology*, 1981, 26(3-4): 171-175.
- [7] Heneghan S P, Lockear S, Geiger D, et al. Static tests of jet fuel thermal and oxidative stability[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1993, 9(1): 5-9.
- [8] Altin O, Eser S. Analysis of solid deposits from thermal stressing of a JP-8 fuel on different tube surfaces in a flow reactor [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2001, 40(2): 596-603.
- [9] Klavetter E A, Martin S J, Wessendorf K O. Monitoring jet fuel thermal stability using a quartz crystal microbalance [J]. *Energy & Fuels*, 1993, 7(5): 582-588.
- [10] Marteney P J, Spadaccini L J. Thermal decomposition of aircraft fuel[R]. ASME 86-GT-36, 1986.
- [11] Katta V R, Blust J, Williams T F, et al. Role of buoyancy in fuels thermal stability studies [J]. *Thermophys. Heat Transfer*, 1995, 9(1): 159-168.
- [12] Krazinski J L, Vanka S P, Pearce J A, et al. A computational fluid dynamics and chemistry model for jet fuel thermal stability [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1992, 114(1): 104-110.