

# 高温条件下 RP-3 航空煤油的结焦特性

刘天池, 范育新, 赵世龙, 吴伟秋, 黄学民  
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

**摘 要:** 为了解和掌握航空煤油在高温条件下的结焦性能,通过试验分别研究了 RP-3 航空煤油在静止状态下的结焦边界温度与结焦特性,以及不同燃油进口条件、壁温对结焦特性的影响。试验结果表明:燃油静止时其结焦边界温度介于 437~450 K 之间,且随着试验时间的增加,结焦速率呈下降趋势。增加流速,降低进口油温和壁温均可有效降低结焦的生成,且降低进口油温的影响最大。从时间尺度上来看,结焦在前期的累积较慢,但在形成一定量的结焦后结焦速率会明显提升,以 400 K 进口油温、800 K 壁温、0.5 m/s 燃油流速工况为例,8 h 和 12 h 试验件的结焦量分别达到 4 h 试验件的约 1.5 倍和 7 倍。

**关 键 词:** 航空煤油; 油温; 油管壁温; 燃油流速; 结焦速率; 结焦量

**中图分类号:** V312. + 1      **文献标志码:** A

## Deposition characteristics of RP-3 aviation kerosene under high temperature conditions

LIU Tianchi, FAN Yuxin, ZHAO Shilong,  
WU Weiqu, HUANG Xuemin  
(College of Energy and Power Engineering,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to understand the aviation kerosene's deposition characteristics under high temperature conditions, the RP-3 aviation kerosene's deposition boundary temperature and characteristics under static state, the influences of different fuel inlet conditions and wall temperatures were studied by test. The results indicated that the deposition boundary temperature under static state was between 437—450 K, and the deposition rate decreased with the increase of test time. Increasing the flow velocity, and decreasing the fuel inlet temperature and the wall temperature can effectively reduce the deposition amount, and decreasing the fuel inlet temperature had the most effective impact. From the perspective of time scale, deposition accumulated slowly in the early stage, but increased significantly when a certain deposition amount had been formed. Taking the 400 K fuel inlet temperature, 800 K wall temperature and 0.5 m/s flow velocity test as example, the deposition amount of 8 h and 12 h test was about 1.5 times and 7 times that of the 4 h test, respectively.

**Key words:** aviation kerosene; fuel temperature; tube wall temperature; fuel flow velocity; deposition rate; deposition amount

燃气涡轮发动机的发展和性能的提高对冷却系统提出了更高的要求,为了在提高涡轮前温度的同时减少热管理问题,如今发动机冷却系统中常将比热容相对空气更高的燃油用作冷却剂<sup>[1-2]</sup>。将燃料作为冷源,燃料随着温度的升高其显焓增加,可以燃烧更少的燃料来达到一定程度的推力,从而降低燃料的消耗。除了节省燃料外,增加燃气涡轮发动机燃料的温度,还可以提高燃烧效率和降低排放<sup>[3]</sup>。

虽然提高燃油温度具有很多优点,但温度过高时会引发结焦,对整个发动机系统的运行造成不利影响。波音公司的报告就指出,通用亚声速商用飞机在慢车工况时,燃油从油箱流经油泵等高温部件到达喷嘴时的温度为 423~473 K<sup>[4]</sup>,在此温度下燃油有很高的结焦风险。此外,随着发动机的发展,燃烧室的气动条件也变得更加苛刻,对于推质比 10 及以上的发动机来说,燃烧室进口的空气温度可高达 800 K 以上<sup>[5]</sup>,这就使得燃烧室工作部件长期暴露在高温环境当中,燃油在进入这些部件后温度进一步上升,使得结焦风险进一步增加。

由于结焦的化学机理较为复杂,目前仍处在认识的阶段,因此研究工作多以试验研究展开,主要分为静态和动态两种。静态试验通常将燃油在指定温度下加热一段时间,试验结束后通过过滤其中的不溶物质、观察燃油颜色变化等方式来评估氧化程度。还有部分试验是将金属置于被加热的燃油中,试验结束后对金属上的焦炭进行评估<sup>[6]</sup>。Zabarnick 的静态试验研究表明,温度对结焦速率有明显影响,在 413~453 K 范围内温度越高结焦速率越快<sup>[7]</sup>。对于燃油的动态结焦试验,国内外均展开了较多研究,多以被加热的圆管作为试验件,旨在了解温度、流速、压力、油管材料等物理因素对结焦特性的影响。在这些被研究物理量中,NASA 的一个部门认为存在如下优先级:壁温>进口油温>流速(雷诺数)>驻留时间>压力>材料<sup>[4]</sup>。Giovanetti 等人<sup>[8]</sup>研究了 J-A 和 S-A 两种燃油的结焦量与试验时间以及温度的关系,试验管壁温度在 420~750 K,结果表明结焦速率受管壁温度影响很大,且随着试验时间的增加而增大。王英杰等人<sup>[9]</sup>通过恒定热流的加热方式,使燃油在试验件内从 400 K 加热至 700 K,试验结果表明单位质量的 RP-3 航空煤油结焦量在雷诺数  $Re < 2\,665$  时随着雷诺数的增加而减少,但在高雷诺数时随着雷诺数的增加而增加。贾春燕等人<sup>[10]</sup>对 RP-3 航空煤油的研究结果也表明:

增大燃油流量会使得燃油流态发生变化,增强与试验件管壁的换热从而导致结焦速率增加。王英杰等人<sup>[11]</sup>研究了不同进口油温对 RP-3 航空煤油结焦的影响,试验结果表明结焦速率峰值位置会随温度升高而前移,且油温超过 400 K 后管内结焦总量基本不变。据印超等人<sup>[12]</sup>研究了 RP-3 航空煤油流量为 4 g/s 时在 3~7 MPa 下的结焦性能,结果表明提高系统压力可以在一定程度上减少结焦的生成。吴瀚等人<sup>[13]</sup>研究了竖直和水平流动对结焦的影响,研究发现结焦速率在管内的分布均呈单波峰形态,且结焦总量相近,但重力会导致峰值点发生偏移。对于材料表面对结焦的影响,Eser 等人比较了 JP-8 煤油在 304、316 和 321 不锈钢表面的结焦反应性,结果表明 316 不锈钢表面结焦反应最活跃,这是因为 316 不锈钢的 Ni 质量分数较高而 Cr 质量分数较低导致的,而对于增加了硅钢和玻璃涂层的非催化表面而言,结焦的形成量则显著降低<sup>[14]</sup>。

总而言之,研究燃油结焦的目的仍是为了指导发动机中的相关设计,有机械工程师设定了发动机设计时的一些边界,如控制机体和发动机接口处燃油主流温度在 353~393 K,控制喷嘴进口燃油主流温度在 436 K,喷嘴湿壁最高温度在 478 K<sup>[15]</sup>。此举旨在保证最小的燃油热降解,从而能使燃油系统及各部件的结焦量达到最小。不过这并没有考虑到目前不同喷气燃料固有属性的一些差异。此外,目前国内外的动态结焦试验的研究多以恒热流的方式进行,关于恒定壁温下的试验研究开展的较少,因此,本文针对国产 RP-3 航空煤油,研究其在静止条件下的结焦边界和流动状态下的结焦性能,对指导发动机的相关设计,了解结焦规律具有重要意义。

## 1 煤油物性及结焦机理分析

煤油是石油产品之一,包括 C7~C16 等多种烷烃、不饱和烃、环烷烃和芳香烃,一般来说,其平均相对分子质量在 200~250,密度在 0.80 g/cm<sup>3</sup> 左右,沸点为 383~623 K,闪点为 311~373 K,着火温度为 523~882 K,运动黏度为 1.0~2.0 mm<sup>2</sup>/s,表面张力约为 0.027 N/m,蒸发潜热约 291 kJ/kg,其具体物性受产地、生产年份等影响而存在差异。我国的 RP-3 航空煤油,其具体组成成分见表 1,主要由饱和碳氢化合物和芳香族化合物组成<sup>[16]</sup>。文献[17]中指出,芳香烃的质量分数越高,喷嘴在高温下的结焦量越多。

表 1 国产 RP-3 航空煤油组成成分的质量分数

Table 1 Mass fraction of composition of RP-3 aviation kerosene

| 成分      |          | 质量分数/% |      |
|---------|----------|--------|------|
| 饱和碳氢化合物 | 链烷烃      | 52.2   |      |
|         | 环烷烃      | 单环     | 33.8 |
|         |          | 双环     | 6.0  |
|         |          | 三环     | 0.1  |
|         | 烃基苯      | 5.1    |      |
| 芳香族化合物  | 二氢化萘(满萘) | 1.3    |      |
|         | 萘        | 0.6    |      |
|         | 萘的衍生物    | 0.9    |      |
| 合计      |          | 100    |      |

至今为止,关于燃油结焦的机理仍在研究当中,但通常认为,在热应力条件下,这些不溶性沉积物的形成可以被广泛地归类为两种机制的结果,即自氧化和热解。每一种机制都由一系列的吸热反应组成,最终导致“类似于胶状物质”的沉淀。

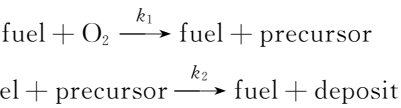
燃油的自氧化是指燃油与氧气之间发生的包含自由基链的反应,通常在 423 K 左右开始发生,主要受到燃油成分、杂质(如硫等)以及溶解氧的影响。Hazlett 在文献[4]中总结了链烷烃的氧化机理,如表 2 所示,在这个模型中,燃料中的碳氢化合物与溶解氧反应生成氢过氧化物,作为沉积形成的前驱体。

表 2 链烷烃氧化机理概述<sup>[18]</sup>

Table 2 Overview of paraffin autoxidation mechanism<sup>[18]</sup>

| 反应阶段 | 反应机理                                                   |
|------|--------------------------------------------------------|
| 起始反应 | $R-H+X\rightarrow R\cdot +XH$                          |
|      | $R\cdot +O_2\rightarrow ROO\cdot$                      |
| 传播反应 | $ROO\cdot +R-H\rightarrow ROOH+R\cdot$                 |
|      | $ROO\cdot +ROO\cdot \rightarrow ROH+R'\cdot COR''+O_2$ |
| 终止反应 | $ROO\cdot +R\cdot \rightarrow ROOR$                    |
|      | $R\cdot +R\cdot \rightarrow R-R$                       |

Giovanetti 等人<sup>[8]</sup>则提出一种简单的两步反应机理,将燃油的自氧化结焦过程简单地描述为:燃油首先与溶解氧反应生成结焦前驱物(precursor),而后结焦前驱物在流体中通过扩散在管道壁面形成结焦沉积(deposit)。



燃油的热裂解结焦通常发生在 573 K 以上,长链烃类的热解成为主要的反应过程,不再需要氧气参与,此时结焦的形成主要由烷烃裂解形成环烷烃从而形成多环芳烃导致<sup>[18]</sup>。

由 Andresen 等人研究得出的结论是在 423~623 K 的燃料温度范围内,自氧化作用在沉积物的形成中占主导地位,而热解在超过 573 K 的温度下占主导地位<sup>[19]</sup>。这些温度范围不是绝对的,不同的研究成果显示,这些值有细微的变化。Chin 等人<sup>[20]</sup>总结了碳氢化合物燃油结焦的三个阶段,如图 1 所示。

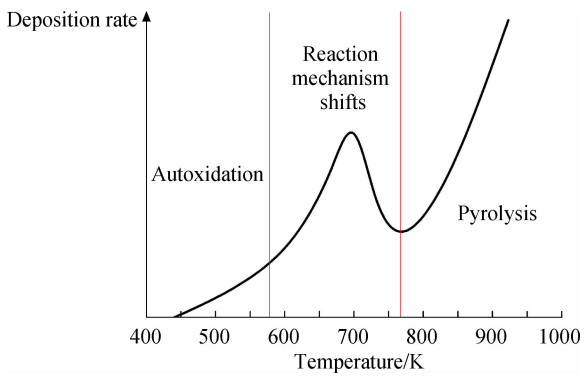


图 1 结焦速率随温度变化曲线

Fig. 1 Deposition rate of fuel varying with temperature

在温度低于 570 K 时,燃油通过自氧化反应结焦,结焦反应随温度增加而增强;当温度在 570~770 K 之间时,自氧化和热裂解同时存在,随着温度的增加,反应机理逐渐由热氧化过渡到热裂解,结焦速率在 700 K 左右达到峰值,随着温度进一步升高,结焦速率呈下降趋势;当温度大于 770 K 时,自氧化反应不再明显,结焦主要由热裂解作用引起,结焦速率随温度增加而升高。

2 试验系统及工况

2.1 试验系统

本文分别针对燃油静态和动态下的结焦特性展开试验研究。进行静态结焦试验时,将长为 100 mm,内径为 3 mm,壁厚为 1.5 mm 的 304 不锈钢试验件内注满 RP-3 航空煤油,为防止试验中燃油泄漏,使用不锈钢卡套堵头将试验件两端密封,而后放入恒温的管式炉内,试验结束后取出并将试验件截成 50 mm 小段进行结焦量称量。

进行动态结焦试验时,参考国内外相关试验台的设计思路,搭建了结焦试验系统如图 2 所示。

试验台主要分为预热段和试验段。预热段使用 ZR-JRQ-60 管道加热器对航空煤油进行加热,使其达到指定入口温度,用于模拟不同的进口燃油温度。加热器功率为 60kW,最大可将 120g/s 流量的常温燃油加热至 473 K,最大工作压力为 6 MPa。

试验段用于模拟燃油在管道壁面进行的结焦

反应,参考 Vranos、金如山等人<sup>[21-22]</sup>的试验方法,用铜块夹持住不锈钢管试验件,在接触良好时,铜块与不锈钢试验件之间的导热可认为满足界面连续条件<sup>[23]</sup>,分界面上满足温度和热流密度连续(如图 3,  $T$  表示温度,  $\lambda$  表示热导率,  $n$  表示沿交界面法线方向),而由于铜的热导率较高,可以将铜一侧的温度看成恒温,因此在交界面处管壁侧也可认为是恒温。

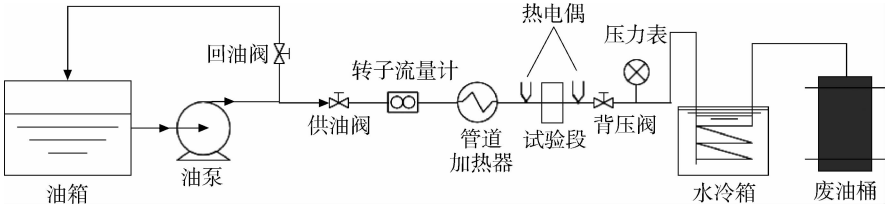
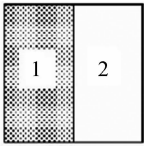


图 2 试验系统示意图

Fig. 2 Diagram of test apparatus



$$T_1 = T_2, \quad \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right)_1 = \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_2$$

图 3 不均匀材料的界面条件

Fig. 3 Interface conditions of heterogeneous materials

试验段示意图如图 4 所示,试验件为内径为 3 mm、外径为 6 mm、长为 50 mm 的 304 不锈钢管,夹持铜块外径为 140 mm,铜块外部由一功率为 1200 W 的陶瓷加热圈包裹。试验件管壁温度由测温热电偶实时测量并通过固态继电器及温控仪控制,温控单元电路图如图 5 所示(图中 AC 为交流电)。试验段进出口分别设置热电偶监测进出口油温。

此外,因燃油出口温度较高,在试验段出口设置水冷装置对其进行冷却,试验中燃油不循环使

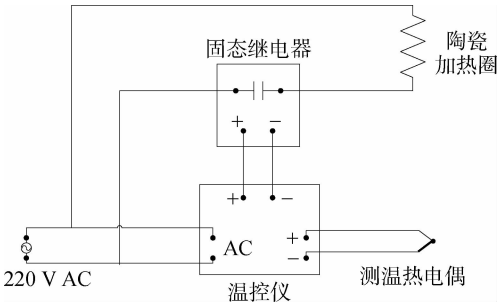


图 5 温控单元示意图

Fig. 5 Wiring diagram of test section heater

用,经冷却装置冷却后流入废油桶,集中收集。

2.2 试验工况

静态结焦试验和动态结焦试验分别按表 3 和表 4 中工况进行,试验用煤油为南京炼油厂产的 RP-3 航空煤油,动态试验时系统压力为常压。

| 表 3 静态结焦试验工况表                                |                             |
|----------------------------------------------|-----------------------------|
| Table 3 Operating conditions for static test |                             |
| 参数                                           | 数值                          |
| 燃油温度 $T_f$ /K                                | 550,500,450,437,425,400,350 |
| 试验时间/h                                       | 4,8,12                      |

| 表 4 动态结焦试验工况表                                 |                   |               |            |
|-----------------------------------------------|-------------------|---------------|------------|
| Table 4 Operating conditions for dynamic test |                   |               |            |
| 进口油温<br>$T_{in}/K$                            | 燃油流速<br>$v/(m/s)$ | 壁温<br>$T_w/K$ | 试验<br>时间/h |
| 400                                           | 0.5,2             | 800,600       | 4,8,12     |
| 330                                           | 0.5               | 800,600       | 4,8,12     |

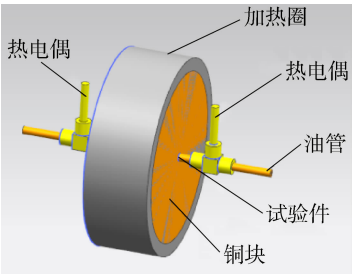


图 4 试验段示意图

Fig. 4 Diagram of test section

2.3 试验和测试方法

本文采用“称质量法”对试验件上的结焦量进行定量测量,试验件的处理流程如图 6 所示,两次称重的差值即为结焦量大小,其中为避免振动造成结焦脱落影响称量结果,切管时采用手动切割的方式进行。所用天平型号为赛多利斯 QUI-NIX35-1CN,分度值为 0.01 mg,重复性标准偏差为 0.02 mg,除焦采用 SP-401 水溶性清洗剂进行超声波清洗。

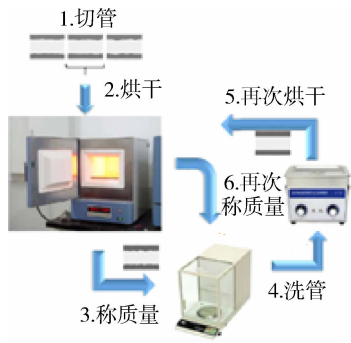


图 6 试验件处理流程图<sup>[7]</sup>

Fig. 6 Diagram of test piece handling<sup>[7]</sup>

此外,为消除试验件自身不洁净而造成的误差,提高测量结果的准确性,试验前需先对不锈钢试验件进行超声波清洗,试验件质量随清洗时间的变化如图 7 所示,清洗 6 h 后质量不再发生变化,故每次试验前需先对试验件清洗 6 h。

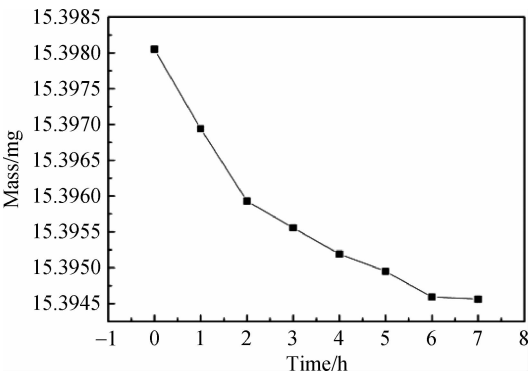


图 7 试验件质量随清洗时间变化

Fig. 7 Mass of test piece varying with cleaning time

试验中结焦量是通过高精度微量天平称量超声波清洗前后不锈钢管的质量间接求得,关系式为

$$m' = m - m_0 \tag{1}$$

式中  $m$  和  $m_0$  分别为清洗前后的试验件质量,故结焦量称量的不确定度为

$$U_{m'} = \sqrt{U_m^2 + U_{m_0}^2} \tag{2}$$

式中  $U$  表示不确定度,而由微量天平直接测量所得结果的不确定度  $U$  的计算公式为

$$U = \sqrt{S^2 + \Delta_a^2} \tag{3}$$

其中  $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{N - 1}}$  为标准差,  $\Delta_a^2$  是仪器误差,一般按仪器最小分度的一半计算。

当  $S$  取天平的重复性标准差时,由式(3)可得

$$U_m = U_{m_0} = \sqrt{S^2 + \Delta_a^2} =$$

$$\sqrt{0.02^2 + 0.005^2} = 0.0206 \text{ mg}$$

将式(3)代入式(2)中可得

$$U_{m'} = \sqrt{U_m^2 + U_{m_0}^2} =$$

$$\sqrt{0.0206^2 + 0.0206^2} = 0.02913 \text{ mg}$$

因此在测量过程中,若两次称量差值在 0.03 mg 以内,便认为试验件在清洗前后质量未发生变化,即未发生结焦。

3 试验结果及分析

3.1 静态燃油结焦边界条件

图 8 所示是表 3 工况下试验件管壁的结焦量,在 437 K 及以下的燃油温度均未测量到管壁有结焦生成。图 9 所示是试验件管壁的结焦速率对比,结焦速率的定义式为

$$r = \frac{\Delta m'}{A \Delta t} \tag{4}$$

式中  $\Delta m'$  表示结焦量的差值,  $\Delta t$  表示试验时间的差值,  $A$  表示试验件内壁面的面积。

从图 8 中可以看出,随着燃油温度的升高,试验件管壁的结焦量也随之增加,但这种趋势随着试验时间的增加而变得不明显。从图 9 可以看

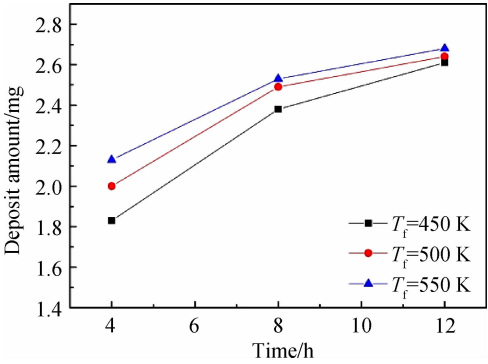


图 8 静态试验管壁结焦量

Fig. 8 Deposition amount on tube wall of static test

到,随着时间的增加,结焦速率均呈下降趋势。前文提到,文献[8]中指出氧化结焦可以简单地认为是一个两步反应,温度(影响化学反应速率)和氧(反应物)是影响结焦生成的两个重要因素。所以,550 K 燃油温度下结焦量最大的原因在于燃油温度的升高使得氧化反应速率加快;而随着试验时间的增加,燃油中的溶解氧逐渐被消耗,因此结焦速率会逐渐下降。

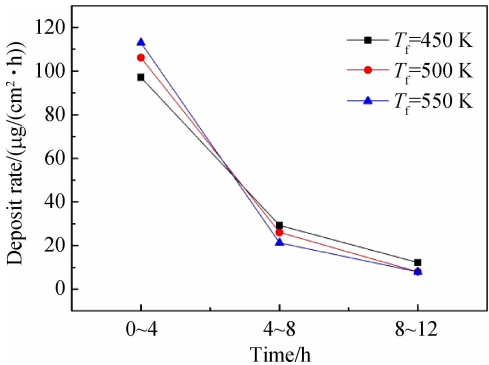


图 9 静态实验结焦速率对比  
Fig. 9 Deposition rate of static test

从图 9 中还可看到,在 0~4h 时,结焦速率大小与温度呈正相关,温度越高则结焦速率越快,而在 4~8h 和 8~12h 则呈现出相反的规律。这是因为 0~4h 时燃油中的溶解氧含量水平较高,故温度的影响显得更为明显,结焦速率随温度的升高而提高;但随着试验时间加长,燃油内的溶解氧逐渐被消耗,温度对结焦速率的提升效果减弱,此时前期结焦较少、溶解氧剩余较多的 450 K 试验件反而结焦速率更快。

由以上试验结果及分析可知,当燃油静止在管道中时,其结焦边界温度介于 437~450 K 之间,且其结焦特性受温度和溶解氧的影响均很大,在试验初期、溶解氧含量较高时温度的影响更为明显,而更长试验时间下的结焦量大小主要受到溶解氧的影响。

3.2 燃油条件对结焦特性的影响分析

流动燃油的结焦试验按照表 3 中的工况进行,图 10 所示是 400 K 进口油温、不同燃油流速和壁温下的试验结果。图 11 所示是 0.5 m/s 燃油流速、不同壁温和进口油温下的试验结果。

3.2.1 燃油流速对结焦的影响分析

由图 10 可见,燃油流速对结焦量的影响非常大,在进口油温和管壁温度一定时,提高燃油流速可以显著降低结焦的生成。图 12 所示是图 10 工

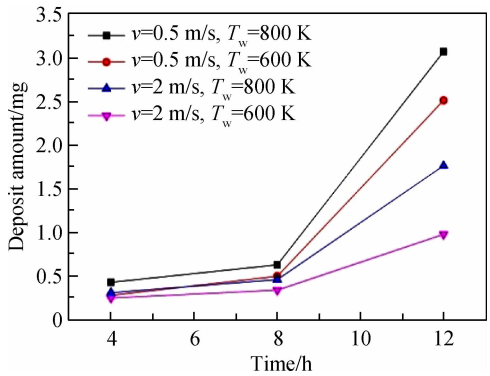


图 10 不同燃油流速、壁温下试验结果( $T_{in}=400\text{ K}$ )  
Fig. 10 Test results at different fuel velocities and wall temperatures ( $T_{in}=400\text{ K}$ )

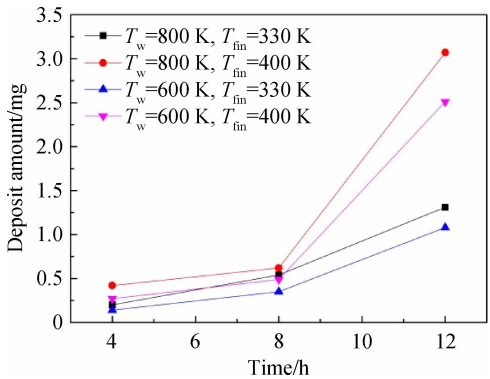


图 11 不同进口油温、壁温下试验结果( $v=0.5\text{ m/s}$ )  
Fig. 11 Test results at different fuel inlet temperatures and wall temperatures ( $v=0.5\text{ m/s}$ )

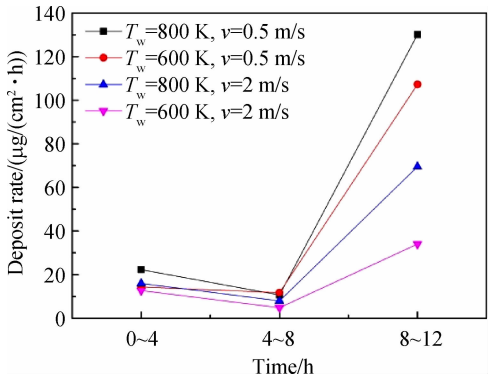


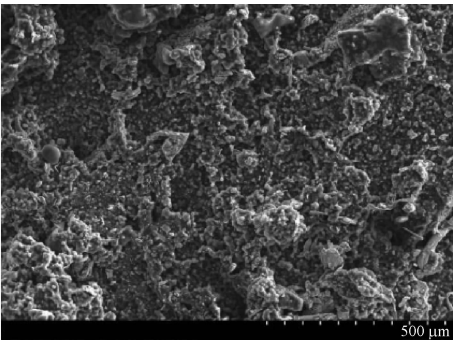
图 12 不同燃油流速、壁温下结焦速率  
Fig. 12 Deposition rate at different fuel velocities and wall temperatures

况下的结焦速率对比,可以看到,800 K 壁温下将燃油流速从 0.5 m/s 增大至 2 m/s 后,8~12 h 的结焦速率降低了 46%,而 600 K 壁温下 8~12 h 的结焦速率降低了 68%。这是因为影响结焦的因素主要有进口油温、壁温以及驻留时间等,增加

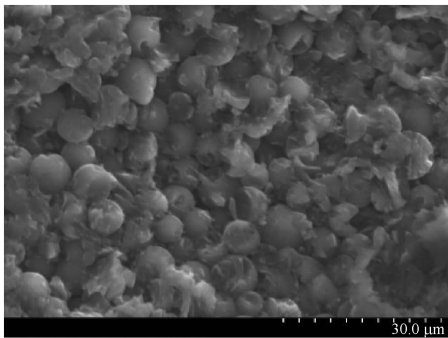
燃油流速时,虽然燃油与壁面的换热增强,但由于燃油在管内的驻留时间缩短,燃油温升反而降低,结焦反应时间也相应减少。此外,燃油流速的增大会使得燃油对壁面沉积物的冲刷作用增强,会带走一部分已形成的沉积物。以上两者的共同作用,导致了在增大燃油流速后结焦明显减少的现象。同时,图 10 结果还表明,相比将壁温从 800 K 降低至 600 K,将燃油流速从 0.5 m/s 增加至 2 m/s 能更好地抑制结焦,这与许多研究指出的壁温影响最大的观点有所不同,分析认为这是因为本文试验所用的试验件长度较短造成的,燃油在试验段内驻留时间太短,生成前驱物后未能形成在壁面的黏附。

此外,在高温下流动燃油试验时间对结焦的生成也有很大的影响,以 400 K 进口油温、800 K 壁温、0.5 m/s 燃油流速工况为例,8 h 试验件结焦量约为 4 h 试验件的 1.5 倍,但 12 h 试验件的结焦量则达到 4 h 试验件的 7 倍左右。从图 12 中可以看到,结焦速率在 0~8 h 较低,其中 4~8 h 甚至有略微降低,但基本与 0~4 h 接近,这说明结焦在试验初期的积累是比较缓慢的,而结焦速率在 4~8 h 略有降低的原因分析认为在于结焦在管壁上的附着增加了壁面与燃油之间的换热热阻,减弱了换热,这也说明在试验初期洁净的管壁相对来说更易形成结焦。而结焦速率在 8~12 h 均显著增大,这说明在积累到一定量后结焦速率会加快。文献[24]的试验结果与本文类似,这是因为结焦多为结构不规则的沉积物,在管壁形成形状各异的凹坑,增大了管壁的粗糙度,如图 13 所示,近壁处的燃油在流经时容易在这些小凹坑中形成涡旋运动,从而增加了驻留时间,更易形成结焦。

从图 12 中还可看到,在 600 K 壁温下,将燃油流速从 0.5 m/s 增大至 2 m/s,8~12 h 的结焦速率比 800 K 壁温时降低得更多,这也说明在壁温较低时增大流速可以更显著地抑制结焦的生成。



(a) 放大100倍表面微观形貌



(b) 放大1500倍表面微观形貌

图 13 电镜拍摄结焦表面形貌<sup>[24]</sup>

Fig. 13 Deposition surface morphology photographed by electron microscope<sup>[24]</sup>

3. 2. 2 进口油温对结焦的影响分析

对比图 10 和图 11 中 12 h 结焦量试验结果,相对于增加燃油流速,降低进口油温能更大程度地降低结焦的生成,可见进口油温较流速而言对结焦的影响更大。而在图 11 中可以看到,600 K 壁温、400 K 进口油温时 12 h 结焦量明显大于 800 K 壁温、330 K 进口油温,这说明进口油温对结焦的影响相对壁温更为明显,可见在本文各研究参数量中,进口油温对结焦量的影响最大。这是因为更高的进口油温可以生成更多的前驱物,从而在发生壁面反应时会有更多的结焦黏附,这也反映出前驱物浓度在结焦反应中的重要影响。图 14 为图 11 工况下的结焦速率对比图,可以看到,降低进口油温后,各阶段的结焦速率随时间呈现上升的趋势,但都处于较低的水平,没有出现上文中提到的 8~12 h 显著提高的现象,这说明降低进口油温对抑制长时间工作在高温下的燃油结焦生成更有利。

此外,330 K 进口油温时结焦速率在 4~8 h

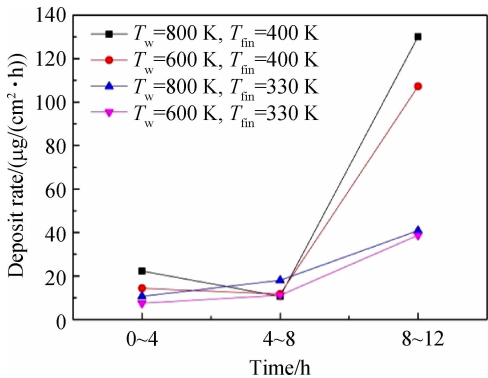


图 14 不同进口油温、壁温下结焦速率( $v=0.5\text{ m/s}$ )  
Fig. 14 Deposition rate at different fuel inlet temperatures and wall temperatures ( $v=0.5\text{ m/s}$ )

未出现降低的现象,330 K 进口油温、800 K 壁温时的结焦速率甚至大于 400 K 进口油温在这一阶段的结焦速率,分析认为是因为 330 K 进口油温工况下前 4 h 积累的结焦量相对 400 K 进口油温工况来说较小,没有达到明显影响燃油和管壁换热的程度。

3.3 壁温对结焦特性的影响分析

管壁温是影响燃油结焦的重要因素,壁温越高,结焦量越大,图 10 试验结果反映了这一点,在 400 K 进口油温、0.5 m/s 流速下,800 K 壁温试验件 12 h 的结焦量是 600 K 壁温的 1.2 倍,而 2 m/s 的流速时,达到了 1.8 倍。可见,在更高的流速下,壁温的影响变得更为明显。图 12、图 14 对于结焦速率的对比则表明,提高壁温同时也会加快结焦速率。这是因为壁温的升高会加快前驱物在壁面生成结焦的反应速率。

虽然在文中第 3.2 节的分析中,认为壁温没有流速和进口油温的影响大,但在图 11 中可以看到,330 K 进口油温、800 K 壁温工况下,8 h 的结焦量还是出现了大于 400 K 进口油温、600 K 壁温的情况,这一方面体现了壁温在结焦过程中的重要影响;另一方面也说明结焦过程中各物理参数

1) 关于进口油温的拟合( $330\text{ K}\leqslant T_{\text{fin}}\leqslant 400\text{ K}$ )

$$r = \begin{cases} 0.44463T_{\text{fin}} - 123.56143 & (v = 0.5\text{ m/s}, T_{\text{w}} = 800\text{ K}) \\ 0.17179T_{\text{fin}} - 37.59029 & (v = 2\text{ m/s}, T_{\text{w}} = 800\text{ K}) \end{cases}$$

2) 关于燃油流速的拟合( $0.5\text{ m/s}\leqslant v\leqslant 2\text{ m/s}$ )

$$r = \begin{cases} -18.156v + 53.465 & (T_{\text{fin}} = 400\text{ K}, T_{\text{w}} = 600\text{ K}) \\ -15.444v + 62.012 & (T_{\text{fin}} = 400\text{ K}, T_{\text{w}} = 800\text{ K}) \\ -2.71133v + 24.52167 & (T_{\text{fin}} = 330\text{ K}, T_{\text{w}} = 800\text{ K}) \end{cases}$$

3) 关于壁温的拟合( $600\text{ K}\leqslant T_{\text{w}}\leqslant 800\text{ K}$ )

$$r = \begin{cases} 0.04951T_{\text{w}} + 14.678 & (T_{\text{fin}} = 400\text{ K}, v = 0.5\text{ m/s}) \\ 0.06986T_{\text{w}} - 24.76 & (T_{\text{fin}} = 400\text{ K}, v = 2\text{ m/s}) \end{cases}$$

从结焦速率关于进口油温的拟合结果可以看到,当燃油流速较低时(0.5 m/s),关系式的斜率更大,这说明结焦速率此时受到进口油温的影响更大;关于流速的拟合结果则表明,在更低的壁温(600 K)和更高的进口油温(400 K)下,流速的影响更明显,其中进口油温为 330 K 时的斜率显著低于 400 K 进口油温,这反映了进口油温的重要影响;而关于壁温的拟合结果则反映了在更高流速下壁温的影响更为明显。

4 结 论

本文通过试验测量了燃油静止时在不同温度

影响的复杂性,并不能在较广泛的工况范围内体现完全一致的规律。当然,上文分析也提到,本文试验结果未能明显体现出壁温影响作用的原因可能还与试验件长度较短有关。

3.4 试验结果拟合分析

表 5 所示为各工况下试验件在 12 h 内的平均结焦速率计算结果。

表 5 试验件 12 h 内平均结焦速率  
Table 5 Average deposition rate of test piece in 12 h

| 进口油温/K | 燃油流速/(m/s) | 壁温/K | 平均结焦速率/( $\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{h})$ ) |
|--------|------------|------|-----------------------------------------------------|
| 400    | 0.5        | 600  | 44.387                                              |
|        |            | 800  | 54.290                                              |
|        | 2          | 600  | 17.153                                              |
|        |            | 800  | 31.124                                              |
| 330    | 0.5        | 800  | 23.166                                              |
|        | 2          |      | 19.099                                              |

由表 5 结果,分别针对进口油温  $T_{\text{fin}}$ 、燃油流速  $v$  和壁温  $T_{\text{w}}$  对结焦速率( $r$ )在试验工况范围内进行线性拟合,拟合结果如下所示:

下的结焦量以及在不同进口温度、流速和壁温下的结焦量,根据以上试验结果和分析,可得出以下结论:

1) 燃油处于静止状态时其结焦边界温度介于 437~450 K 之间,且主要受到燃油温度和溶解氧的共同影响,燃油温度越高,结焦量越大,但随着试验时间的增加这种趋势逐渐减弱,结焦速率则随试验时间的增加呈下降趋势;

2) 在高压壁温下增大燃油流速能明显降低结焦生成,在 400 K 进口油温的条件下,壁温为 800 K 时将流速从 0.5 m/s 增大至 2 m/s 可使 8~12 h 的结焦速率降低 46%,而壁温为 600 K 时该值达

到了68%；

3) 进口油温对结焦量的影响最明显,尤其在长时间试验工况下,相比增大流速,降低进口油温可以更明显地抑制结焦生成；

4) 提高管壁温度会明显增加结焦的生成,在400 K 进口油温、0.5 m/s 流速的条件下,800 K 壁温试验件12 h 的结焦量是600 K 壁温试验件的1.2 倍,而2 m/s 的流速时,800 K 壁温试验件12 h 的结焦量达到了600 K 壁温试验件的1.8 倍；

5) 从时间尺度上来看,结焦在前期的累积较慢,但在形成一定量的结焦后结焦速率会明显提升。因此,在实际发动机中若能对工作一段时间的管路进行除焦操作,减少管壁上焦炭的积累,可使燃油的结焦速率维持在一个较低的水平。

## 参考文献：

- [1] 朱锟,邓宏武,王英杰,等. 超临界压力下航空煤油结焦换热综述及实验[J]. 航空动力学报,2010,25(11):2472-2478.  
ZHU Kun,DENG Hongwu,WANG Yingjie,et al. Review and experimental study of the coke deposition and heat transfer characteristics of aviation kerosene at supercritical pressure[J]. Journal of Aerospace Power,2010,25(11):2472-2478. (in Chinese)
- [2] 袁立公,邓宏武,徐国强,等. 超临界压力下航空煤油 RP-3 壁面结焦特性对换热的影响[J]. 航空动力学报,2013,28(4):832-837.  
YUAN Ligong,DENG Hongwu,XU Guoqiang,et al. Effects of RP-3 coke deposition on heat transfer under supercritical pressure[J]. Journal of Aerospace Power,2013,28(4):832-837. (in Chinese)
- [3] WIEST H K. Experimental study of gas turbine combustion with elevated fuel temperatures[D]. West Lafayette, US:Purdue University,2013.
- [4] HAZLETT R N. Thermal oxidation stability of aviation turbine fuels[M]. Philadelphia, US: ASTM International, 1991.
- [5] 高栋,李锋,尚守堂,等. 航空发动机主燃烧室燃油总管流动换热特性研究[J]. 航空发动机,2015,41(6):22-27.  
GAO Dong,LI Feng,SHANG Shoutang,et al. Investigation on flow and heat transfer characteristics of fuel manifold for aeroengine combustor[J]. Aeroengine,2015,41(6):22-27. (in Chinese)
- [6] 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(2):271-277.
- [7] 裴鑫岩. 航空煤油超临界换热与氧化结焦理论与实验研究[D]. 北京:清华大学,2016.  
PEI Xinyan. Numerical and experimental study of heat transfer characteristics and oxidation deposition of aviation kerosene at supercritical pressure[D]. Beijing: Tsinghua University,2016. (in Chinese)
- [8] GIOVANETTI A J, SZETELA E J. Long-term deposit formation in aviation turbine fuel at elevated temperature[J]. Journal of Propulsion and Power,1986,2(5):450-456.
- [9] 王英杰,徐国强,吴宏伟,等. 进口雷诺数影响 RP-3 结焦特性实验研究[J]. 工程热物理学报,2009,30(10):1710-1712.  
WANG Yingjie,XU Guoqiang,WU Hongwei,et al. Experimental investigation of RP-3 thermal oxidation stability[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2009,30(10):1710-1712. (in Chinese)
- [10] 贾春燕,王洪铭. 航空发动机燃烧室喷嘴内部燃油结焦研究[J]. 航空发动机,2011,37(5):41-44.  
JIA Chunyan,WANG Hongming. Investigate on fuel coke in nozzle of aeroengine combustor[J]. Aeroengine,2011,37(5):41-44. (in Chinese)
- [11] 王英杰,徐国强,邓宏武,等. 进口温度影响航空煤油结焦特性实验[J]. 航空动力学报,2009,24(9):1972-1976.  
WANG Yingjie,XU Guoqiang,DENG Hongwu,et al. Experimental study of influence of inlet temperature on aviation kerosene coking characteristics[J]. Journal of Aerospace Power,2009,24(9):1972-1976. (in Chinese)
- [12] 琚印超,徐国强,郭隽,等. 压力对航空煤油 RP-3 结焦的影响[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(3):257-260.  
JU Yinchao,XU Guoqiang,GUO Jun,et al. Effects of pressure on the coking characteristic of jet fuel RP-3[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2010,36(3):257-260. (in Chinese)
- [13] 吴瀚,邓宏武,徐国强,等. 流动方式对航空煤油 RP-3 结焦的影响[J]. 航空动力学报,2011,26(6):1341-1345.  
WU Han,DENG Hongwu,XU Guoqiang,et al. Effects of flow orientations on the coking characteristic of jet fuel RP-3[J]. Journal of Aerospace Power,2011,26(6):1341-1345. (in Chinese)
- [14] VENKATARAMAN R. Solid deposit formation from the pyrolytic and oxidative degradation of jet fuel and diesel fuel[D]. University Park, Pennsylvania State, US: The Pennsylvania State University,2007.
- [15] RAWSON P. AMRL evaluation of the JP-8+100 jet fuel thermal stability additive[R]. Melbourne, Australia: Defence Science and Technology Organization Victoria (Australia) Aeronautical and Maritime Research Lab,2001.
- [16] 齐海帆. 燃烧室头部设计对燃烧室性能影响研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.  
QI Haifan. Research on the influence of combustor dome design on the combustion performance[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2012. (in Chinese)
- [17] 黄义勇. 航空发动机主燃油喷嘴热防护设计技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2011.

[18] LIANG J J. Design and development of an experimental apparatus to study jet fuel coking in small gas turbine fuel nozzles [D]. Toronto, Canada: University of Toronto, 2013.

[19] AGARWAL P,SETHI V,GAUTHIER P Q,et al. Preliminary CFD study on the effect of fuel injector coking on fuel spray characteristics[R]. Gas Turbine India,GTINDIA 2017-4838,2017.

[20] CHIN J S,LEFEBVRE A H. Experimental techniques for the assessment of fuel thermal stability[R]. AIAA 92-0685,1992.

[21] 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.

[22] 金如山. 碳氢燃烧的热稳定性研究:沉积速率试验分析[J]. 燃气涡轮试验与研究,1992(2):10-16,62.

[23] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]4 版. 北京:高等教育出版社,2006.

[24] 骆东. RP-3 航空煤油热氧化结焦特性试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.

LUO Dong. Experimental investigation on autoxidation coking characteristics of aviation kerosene RP-3 [D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)

(编辑:陈 越)