

增材制造螺旋圆管航空煤油热氧化 结焦特性的试验研究

张霖琪, 蒋 杰, 阮 灿, 吕兴才
(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 为得到环境温度、入口雷诺数和磨粒流处理工艺对 RP-3 航空煤油氧化结焦特性的影响, 针对增材制造(3D 打印)螺旋圆管, 采用了恒定环境温度的试验方法, 开展了 RP-3 航空煤油热氧化结焦试验研究。试验结果表明: 当入口雷诺数和试验时间保持恒定时, 无论燃油处于静止还是流动状态, 燃油结焦速率和总结焦量都随着环境温度的增加而增大; 当试验件壁温和试验时间保持不变时, 燃油处于流动状态下, 燃油结焦速率和总结焦量随着入口雷诺数的增大呈现先增加后减少的变化趋势。采用磨粒流处理后, 燃油在试验件内的结焦速率大于基准工况, 总结焦量是基准工况下的 1.17 倍。对试验件内表面进行磨粒流处理不利于抑制结焦沉积。

关 键 词: 增材制造; RP-3 航空煤油; 结焦特性; 环境温度; 入口雷诺数; 磨粒流处理

中图分类号: V312

文献标志码: A

Experimental study on thermal oxidation coking characteristics of aviation kerosene in additively manufactured helical tubes

ZHANG Linqi, JIANG Jie, RUAN Can, LÜ Xingcai
(School of Mechanical Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: For the purpose of obtaining the influence of ambient temperature, inlet Reynolds number and abrasive flow treatment on the coking characteristics of RP-3 aviation kerosene, the RP-3 aviation kerosene thermal oxidation coking tests were carried out in additively manufactured (3D printed) helical tubes through the testing way of constant ambient temperature. The test results showed that when inlet Reynolds number and test time remained constant, the deposition rate and the total coking amount of the fuel increased with the increase of ambient temperature, regardless of whether the fuel was in a static or flowing state; when the fuel was in a flowing state, as inlet Reynolds number increased, the deposition rate increased first and then decreased with constant wall temperature and test time. After abrasive flow treatment, the deposition rate of the fuel in the test tube was greater than that of the fuel under baseline working condition, and the total coking amount of the fuel was 1.17 times the total coking amount of the fuel under baseline working condition. The abrasive flow treatment on the inner surface of the test

收稿日期: 2021-03-19

基金项目: 上海市优秀学术带头人计划资助项目(19XD1401800); 国家自然科学基金重大计划重点项目(91641202)

作者简介: 张霖琪(1998—), 女, 硕士生, 主要研究方向为航空煤油氧化结焦。

引用格式: 张霖琪, 蒋杰, 阮灿, 等. 增材制造螺旋圆管航空煤油热氧化结焦特性的试验研究[J]. 航空动力学报, 2022, 37(7): 1403-1412. ZHANG Linqi, JIANG Jie, RUAN Can, et al. Experimental study on thermal oxidation coking characteristics of aviation kerosene in additively manufactured helical tubes[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(7): 1403-1412.

tube was not conducive to the inhibition of coking deposition.

Key words: additive manufacturing; RP-3 aviation kerosene; coking characteristics; ambient temperature; inlet Reynolds number; abrasive flow treatment

燃气涡轮发动机热力循环的两个关键指标为循环增压比和循环最高温度^[1]。为使燃气涡轮发动机性能水平得到进一步提高,必须突破压气机增压能力瓶颈与涡轮热防护能力瓶颈。当压气机压比增大,压气机出口温度随之升高,此时喷嘴内燃油受热升温的程度也随之加剧。此外,为突破涡轮的热防护能力瓶颈,一种利用热沉较大的航空煤油对涡轮冷却空气进行预冷的新型冷却方式(cooled cooling air,简称 CCA)被提出^[2]。使用航空煤油作为冷源时,其温度会升高。综合以上两点原因,随着燃气涡轮发动机性能水平的提高,燃油在喷嘴内更易形成结焦沉积物。

燃油的结焦过程是一系列复杂的物理化学过程,主要受化学反应因素和物理扩散因素的影响,包括燃油温度、加热时间、压力、雷诺数、溶解氧浓度和表面材料等^[3-4]。Chin 等^[5]针对四种航空煤油开展结焦试验,试验结果表明燃料温度和壁温都对燃料结焦速率有显著的影响,并且燃料温度的影响强于壁温。Tao 等^[6]得到了相似的结论。裴鑫岩^[7]针对超临界压力下 RP-3 航空煤油的氧化结焦特性开展试验研究,考察了温度、溶解氧浓度、入口效应、停留时间、强化对流换热、二次流和温度梯度对燃料氧化结焦过程的影响,发现影响结焦因素的主次要关系排序为温度>氧含量>温度梯度>流动状态。刘天池等^[8]通过试验研究了壁温及燃油进口条件对 RP-3 航空煤油结焦特性的影响,发现降低进口油温和壁温、增加流速均可有效减少结焦的生成,且降低进口油温的影响最大。

结焦反应的发生与燃料的热稳定性相关。温度是结焦机理的主要影响因素,根据结焦机理的不同,结焦可分为氧化结焦和裂解结焦两种形式^[4]。当燃油温度大致处于 421~644 K 之间时,燃油中的溶解氧是结焦形成的主要影响因素,燃油中的溶解氧与燃油的组分发生反应,生成自由基产物,即结焦前驱物,继而引发一系列自由基链式反应,最终导致结焦的形成。当温度进一步升高至约 699 K,结焦机理逐渐转变为裂解结焦^[9]。为保证发动机安全正常运转,燃油喷嘴内部应尽可能地减少结焦沉积^[4]。

航空发动机燃油喷嘴内部的流道形状构型十

分复杂^[10]。而目前国内外大部分研究都是针对直圆管,在弯曲管路上开展的研究较少^[11-14]。Fu 等^[11]针对四种螺旋直径不同的螺旋圆管,在超临界压力下开展了 RP-3 航空煤油热氧化结焦试验,研究结果表明:与直管相比,由于离心力的存在,螺旋圆管的结焦分布更加均匀,结焦峰值不突出。此外,在所有工况下,螺旋圆管的最大总结焦量比直管中的降低了约 69.5%。Pei 等^[12]通过试验和数值模拟研究了 S 形管路中 RP-3 航空煤油复杂流动和换热对氧化结焦的影响,研究发现,二次流的存在导致换热增强,转折处壁温相对较低。此外,在两个转折处,前后的温度梯度越大,结焦沉积物越多。杨治等^[13]针对直管、螺旋管和 L 形弯管三种结构管路,开展了氧化结焦试验研究。研究结果表明,螺旋管的沿程结焦量分布呈现出明显的双峰形式。L 形弯管的结焦峰值位置相较直管提前出现,结焦量在管路弯曲段整体保持较高水平。

表面材料是影响结焦的重要因素之一。目前大部分研究的管路材料均为不锈钢^[15-18],而对于航空发动机而言,其喷嘴材料多为高温合金^[19-20],如 Hastelloy X 合金^[21]。Hastelloy X 合金具有优异的高温强度以及良好的耐腐蚀性,但由于较高的熔点和硬度,传统方法难以对其加工成形。此外,利用传统加工工艺难以成形具有非常复杂形状与构型的零件,特别是具有中空部分或者内部桁架结构的零件。增材制造技术恰能弥补传统加工工艺的缺点。增材制造技术是一种以数字模型文件为基础,利用激光、电弧或电子束等高能热源,将粉末状金属或塑料等可黏合材料,以逐层熔凝堆积的方式成形一体化复杂结构件的加工制造技术^[19]。例如,美国通用电气公司采用增材制造技术生产的 Leading Edge Aviation Propulsion(LEAP)发动机燃油喷嘴实现了 20 个零部件的集成,并且在质量上减少了 25%,耐用度上提高了 5 倍^[19]。

若未经过特殊工艺处理,增材制造管路表面的表面粗糙度将显著增大,这可能导致增材制造管路内燃油结焦情况与现有研究结果之间存在差异,而在此方面的研究较少。Wang 等^[22]人为地在

光滑圆管和方管内引入肋状结构来探究表面粗糙度对航空煤油换热和结焦特性的影响。研究表明,肋状结构带来的表面粗糙度在改善传热性能的同时对结焦过程的减弱也是有益的。磨粒流处理工艺是一种黏弹性磨粒在一定压力下作为可随形变化的加工刀具不断往复流经被加工表面,以降低工件的表面粗糙度,从而完成对待加工表面抛光加工的表面处理技术^[23]。经磨粒流处理后,试验件内表面粗糙度将减小。因此,基于增材制造 Hastelloy X 合金螺旋圆管内开展 RP-3 航空煤油热氧化结焦特性试验研究,得到静止状态以及不同壁温、入口雷诺数下燃油的结焦特性以及磨粒流处理工艺对燃油结焦特性的影响是具有重要意义的,同时能为增材制造燃油喷嘴热防护设计提供理论依据。

1 试验系统及工况

1.1 试验系统

图 1 为燃油热氧化结焦试验系统的示意图。试验系统由供油系统、预热系统、测试段、数据采集系统以及冷却回油系统组成。其中供油系统主要包含高压氮气气瓶、高压油罐、单向阀、过滤器以及燃油流量控制器。试验过程中利用高压氮气向高压油罐加压从而将燃油送入管路中,流经过

滤器滤除燃油中可能存在的杂质,并采用科式质量流量控制器(Bronkhorst M14)对燃油流量进行测量与控制。预热系统主要由预热段和直流稳压电源组成,其中预热段为外径 3 mm 壁厚 0.5 mm 的 316 L 不锈钢管,外壁面覆盖硅酸铝纤维毡以保温。试验过程中使用直流稳压电源和加热带加热管内流过的燃油,并利用比例积分微分控制使得测试段入口温度达到指定值,完成预热过程。测试段采用管式加热炉对试验件进行加热,保持环境温度恒定。因燃油出口温度较高,在测试段出口设置冷凝器对其进行冷却,冷却后的燃油最终进入回油桶,不再循环使用。系统压力由冷凝器后的背压阀(Swagelok-KBP1J0A4A5A20000)控制。

试验主要采集的数据包括测试段进出口燃油温度、试验段前后压差以及管路沿程壁温。数据采集系统主要为一台采集频率为 1 Hz 的无纸记录仪。管路中安装了 5 根 K 型铠装热电偶,分别用于测量预热段进出口、测试段进出口和冷却出口的燃油温度,并采用压差变送器测量试验段前后的压差。另外,管壁上排布了 11 根 K 型热电偶用于测量壁温,测温点($T_{w0} \sim T_{w10}$)分布的示意图和实物图分别如图 2、图 3 所示。测试段进出口压力使用精密数显压力表进行测量。

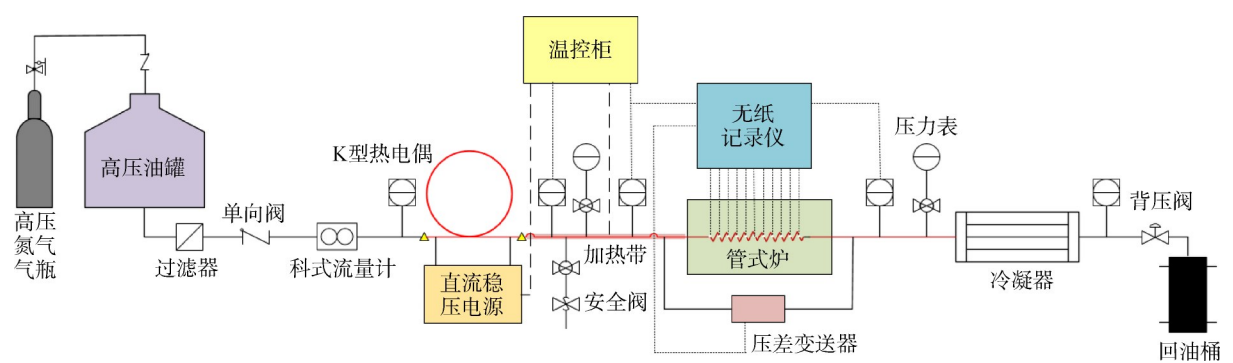


图 1 试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

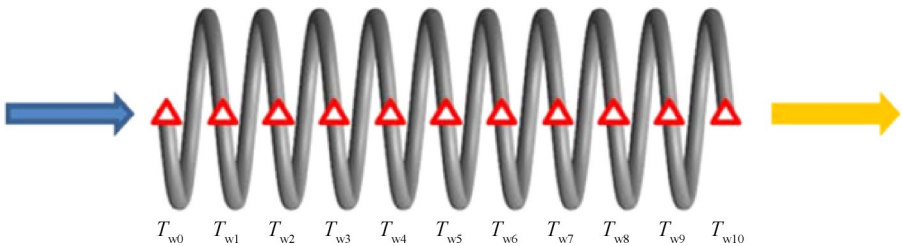


图 2 管壁温度测点分布示意图

Fig.2 Schematic diagram of the distribution of wall temperature measuring points

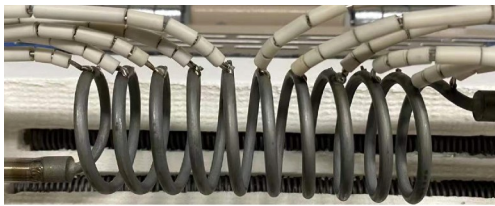


图3 管壁温度测点分布实物图
Fig.3 Photograph of the distribution of wall temperature measuring points

1.2 试验件

本研究采用的试验件为增材制造螺旋圆管,几何示意图如图4所示。其中,螺旋直径为35 mm,螺距为10 mm,试验件高度为140 mm,管路截面形状为圆形,水利直径设计值为1.5 mm,管路壁厚为0.8 mm。

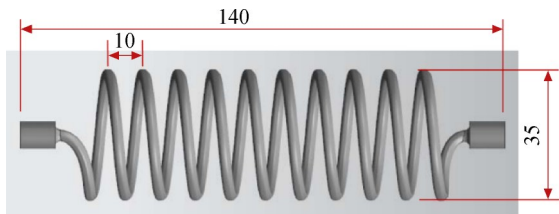


图4 试验件几何示意图(单位:mm)
Fig.4 Schematic diagram of the geometry of experimental tubes (unit:mm)

增材制造使用的金属粉末牌号为 Hastelloy X,其化学成分和物理性能分别如表1、表2所示。

图5为利用型号为 YXLON FF85,分辨率为42.7 μm 的工业 computed tomography (CT) 设备对某个未经处理试验件进行扫描重建后提取出的流道形状图,可以看出流道表面有很明显的凸起

表 1 Hastelloy X 合金的化学成分			
Table 1 Chemical compositions of Hastelloy X			
成分	质量分数	成分	质量分数
C	0.072	P	0.003
Cr	21.49	Cu	0.003
Co	1.61	Al	<0.002
Mo	9.04	Ti	0.012
W	0.55	O	0.007 2
Fe	18.86	N	0.006
B	0.000 2	Ni	47.79
Mn	0.015	Si	0.2
S	0.003		

表 2 Hastelloy X 合金的物理性能
Table 2 Physical properties of Hastelloy X

参数	数值
295 K 密度/(g/cm ³)	8.22
熔点/K	1 533.15~1 628.15
366 K 导热系数/(W/(m·K))	11
366 K 比定压热容/(J/(kg·K))	490

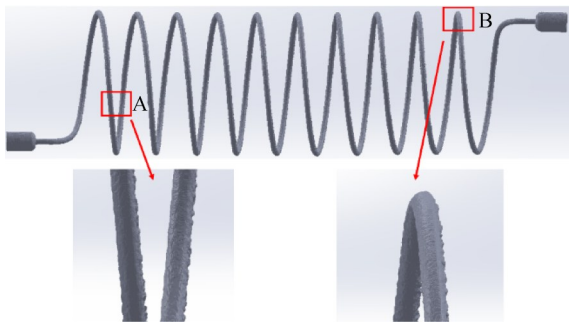


图5 某个试验件进行工业CT扫描重建后提取出的流道形状图
Fig.5 Shape of the flow channel extracted after the industrial CT scan and reconstruction of one experimental tube

和凹坑,表面粗糙度较大,这会对燃油的近壁面流动产生一定的影响,并影响结焦的附着和沉积情况。

图6为对经磨粒流处理后的试验件进行工业CT扫描重建后提取出的流道形状图,可以看出经磨粒流处理后,试验件内表面粗糙程度降低。

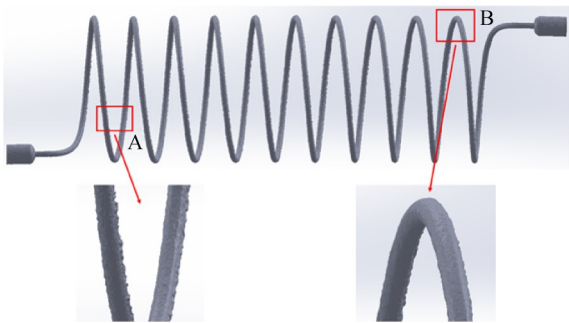


图6 磨粒流处理后的试验件进行工业CT扫描重建后提取出的流道形状图
Fig.6 Shape of the flow channel extracted after the industrial CT scan and reconstruction of one experimental tube treated by abrasive flow

1.3 试验工况

当航空发动机完成飞行任务后停车,燃油喷嘴仍为受热状态,此时喷嘴中未燃烧的燃油仍能

发生结焦反应。此外,当航空发动机处于不同工作状态时,流进喷嘴的燃油会经历与宽范围雷诺数相对应的各种流动条件,同时喷嘴的受热情况也会有所不同。因此,研究静止条件下燃油的结焦特性以及入口雷诺数、环境温度对结焦沉积的影响具有重要的实际意义。另外,增材制造喷嘴内表面的粗糙程度在一定程度上会对燃油的结焦特性造成影响,因此研究磨粒流处理工艺对结焦沉积的影响是十分必要的。RP-3 航空煤油是目

前中国应用最为广泛的军民两用航空煤油,因此本研究选择 RP-3 航空煤油作为研究对象。

本研究的试验工况如表 3 所示,测试段进口温度为 350 K,系统压力为 1 MPa,高压油罐进气压力为 3 MPa。当试验参数都达到设定值后,调节炉温(环境温度)以使 T_{w5} 稳定在设定值,并以 T_{w5} 稳定的时间为试验起始点,试验过程中保持环境温度不变。

表 3 RP-3 航空煤油热氧化结焦试验工况
Table 3 Working conditions for thermal oxidation coking experiments of RP-3 aviation kerosene

工况	入口雷诺数 Re_m	壁温 5 T_{w5}/K	环境温度 T_s/K	进出口压差 $\Delta p/kPa$	试验 时间 t/h	备注
1	0	410	423		12	静止
2	0	420	427		12	静止
3	0	430	432		12	静止
4	3 000	440	722	79.51	4	变环境温度
5	3 000	540	919	79.20	4	变环境温度
6	3 000	500	882	73.93	4	基准工况
7	500	500	674	4.52	4	变雷诺数
8	1 000	500	730	10.57	4	变雷诺数
9	3 000	500	836	55.67	4	磨粒流处理

1.4 结焦量测量方法和不确定度分析

1.4.1 结焦量测量方法

本研究采用截断称重法对结焦量进行定量测量,具体流程如图 7 所示。首先,按照图 2 所示测温点标记位置对管路进行截断;其次,用无水乙醇擦拭外壁后放入 373 K 的干燥箱烘干 3 h,烘干完毕后进行第一次称重。然后,使用结焦清洗剂清洗 14 h,随后用去离子水反复清洗 0.5 h,并用高压气枪吹除残余液体;最后,再次在 373 K 的干燥箱烘干 3 h,烘干完毕后进行第二次称重。

两次称重的差值即为结焦量大小,最终单次试验可以获得 10 段管路结焦量。所用分析天平型号为 METTLER TOLEDO ME204E,天平的重复性标准差为 0.08 mg,最小分度值为 0.1 mg。

1.4.2 不确定度分析

试验中每一段结焦量的表达式为

$$\Delta m_i = M_i - m_i \quad i=1,2,\cdots,10 \quad (1)$$

其中 i 代表分段的编号, M_i 和 m_i 分别为第一次称



图 7 称重法流程图
Fig.7 Flow chart of weighing method

量和第二次称量得到的质量。总结焦量的表达式为

$$\Delta m = \sum_{i=1}^{10} \Delta m_i = (M_i - m_i) \quad (2)$$

根据误差传递公式,利用分析天平直接测量的不确定度为

$$U_{M_i} = U_{m_i} = \sqrt{S^2 + \Delta_a^2} = 0.094 \text{ mg} \quad (3)$$

其中 S 取天平的重复性标准差, Δ_a 为天平的误差, 通常认为是天平最小分度值的一半。因此, 每段结焦量和总结焦量不确定度分别如式(4)和式(5)所示。

$$U_{\Delta m_i} = \sqrt{U_{M_i}^2 + U_{m_i}^2} = 0.133 \text{ mg} \quad (4)$$

$$U_{\Delta m} = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} U_{\Delta m_i}^2} = 0.421 \text{ mg} \quad (5)$$

由图 4 可知, 每段管路的流道面积都可能存在差异, 为了更加准确、更加有对比性, 定义了如式(6)所示的结焦速率来衡量每段管路的结焦情况。

$$\overline{\Delta m_i} = \frac{\Delta m_i}{A_i t} \quad (6)$$

其中 A_i 为每段管路的流道表面积, 通过工业 CT 扫描重建模型获得, t 为试验时间。表 4 为 3 个试验件分段流道面积及其分段平均流道面积和磨粒流处理后的试验件分段流道面积。由表 4 可知, 不同试验件的流道面积存在差异, 在以下分析中除磨粒流处理工况外, 近似认为试验件平均流道表面积与 A_i 相等。

表 4 增材制造螺旋管路流道面积

Table 4 Flow channel area of additive manufacturing helical tubes

i	流道面积/mm ²				
	试验件 1	试验件 2	试验件 3	试验件平均	磨粒流处理
1	527.89	538.69	539.21	535.26	533.19
2	530.10	537.37	542.30	536.59	534.19
3	530.05	540.24	541.70	537.33	536.82
4	533.46	539.89	543.31	538.89	537.94
5	534.98	540.91	542.98	539.62	537.90
6	534.89	543.16	544.18	540.74	536.85
7	534.73	543.62	541.96	540.10	536.42
8	533.65	541.39	539.22	538.09	532.97
9	532.96	539.64	539.06	537.22	530.45
10	528.39	536.65	538.50	534.51	528.60

2 试验结果及分析

2.1 静态 RP-3 航空煤油结焦特性

静止条件下, 燃油流速为 0 m/s, 燃油的氧化

结焦速率只与燃油温度以及燃油中的溶解氧含量有关。为研究静止状态下燃油的结焦特性, 调节环境温度 T_s 以使 T_{w5} 分别稳定在 410、420 K 和 430 K, 并以此刻为加热开始时间进行 12 h 的结焦试验。环境温度对上述工况试验件沿程壁温的影响如图 8 所示。其中坐标原点为图 2 所示第一个测温点 (T_{w0}) 所在位置 (下图同)。由图 8 可知, 试验件管壁的沿程壁温基本随着环境温度的升高而增大。

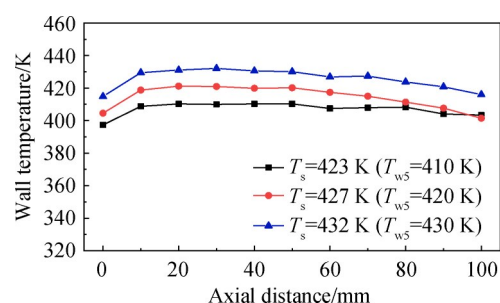


图 8 环境温度对壁温的影响 ($Re=0, t=12 \text{ h}$)

Fig.8 Effects of ambient temperature on wall temperature ($Re=0, t=12 \text{ h}$)

图 9 为静止条件下, 总结焦量随环境温度的变化。由图 9 可知, 试验件总结焦量随环境温度升高明显增大。当改变环境温度以使 T_{w5} 从 410 K 升高到 420 K, 总结焦量仅增加了约 5 mg, 而当其从 420 K 升高至 430 K, 总结焦量增加了 10.6 mg, 总结焦量随 T_{w5} 的平均增长速率由 0.49 mg/K 增加到 1.06 mg/K。

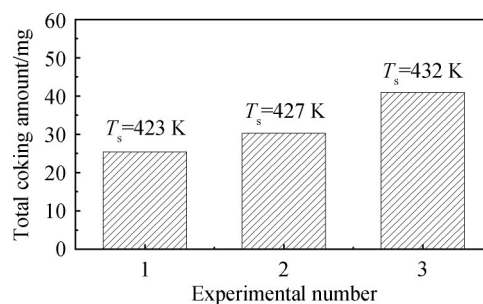


图 9 环境温度对总结焦量的影响 ($Re=0, t=12 \text{ h}$)

Fig.9 Effects of ambient temperature on total coking amount ($Re=0, t=12 \text{ h}$)

2.2 环境温度对 RP-3 航空煤油结焦特性的影响

环境温度对结焦的影响主要源于两个方面。第一, 环境温度通过改变壁温影响燃油温度。燃油温度是决定结焦反应速率的关键因素; 入口雷

雷诺数相同时,燃油温度不同将导致燃油的物性发生变化,如密度和黏度,进而导致燃油沿程雷诺数出现差异,燃油在管内的停留时间也会有所不同。第二,环境温度通过改变壁温影响结焦的沉积过程,壁温升高有利于结焦的沉积过程。

环境温度对试验件沿程结焦速率和壁温的影响如图 10 所示。由图 10 可知,试验件沿程结焦速率随环境温度升高而显著增加且存在峰值。

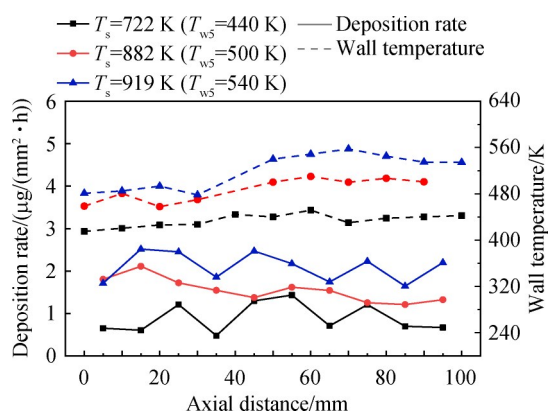
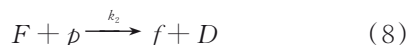
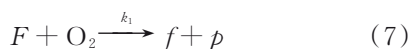


图 10 环境温度对结焦速率和壁温的影响
($Re_m=3\,000$, $t=4\text{ h}$)

Fig.10 Effects of ambient temperature on deposition rate and wall temperature ($Re_m=3\,000$, $t=4\text{ h}$)

为分析上述现象出现的原因,引入一个由简单的两步总包反应模型描述的热氧化结焦反应机理^[24]



其中各组分的净生成率如式(9)~式(11)所示:

$$\frac{d\omega(O_2)}{dt} = -k_1\omega_f\omega(O_2) \quad (9)$$

$$\frac{d\omega_d}{dt} = k_2\omega_f\omega_p \quad (10)$$

$$\frac{d\omega_p}{dt} = -\left(\frac{d\omega(O_2)}{dt} + \frac{d\omega_d}{dt}\right) \quad (11)$$

其中 F 代表燃油组分, f 代表反应后的燃油组分, p 代表结焦前驱物, D 代表结焦沉积物, $\omega(O_2)$ 为燃油中溶解氧浓度, ω_f 为燃油组分浓度, ω_d 为结焦沉积物浓度, ω_p 为结焦前驱物浓度。由上可知,热氧化结焦反应的发生是温度、溶解氧浓度和结焦前驱物浓度共同作用的结果,其中温度主要通过影响化学反应速率来影响结焦反应的发生。随着燃油在管内流动,燃油温度逐渐升高,化学反应速率变大。结焦反应初始阶段,结焦前驱物的生成速

率大于消耗速率,结焦前驱物浓度增大;随着反应继续进行,燃油中的溶解氧逐渐消耗,溶解氧浓度减小,结焦前驱物的消耗速率大于生成速率,此时结焦前驱物浓度减小。因此,在某个位置将出现结焦峰值。进口流速保持不变,当环境温度分别为 919 K 和 882 K 时,其燃油温度和壁面温度皆高于环境温度为 722 K 的工况,燃油温度升高有利于结焦反应的进行,且壁温升高也有利于结焦的沉积过程,因此环境温度为 722 K 工况的结焦峰值出现位置最靠后。随着燃油继续流动,燃油温度升高的积极影响已无法平衡燃油中溶解氧浓度和结焦前驱物浓度下降的消极影响,结焦速率降低。3 个工况下的沿程结焦速率分布曲线都存在第 2 个峰值,这与文献[11]和文献[13]得到的结论相类似。此外,3 个工况下,第 2 个峰值对应的壁温皆在最大值附近,而对于环境温度为 919 K 的工况而言,其温度最高,因此其第 2 个峰值仍最先出现。

结焦过程是沉积过程和去除过程共同作用的结果。结焦在流体中形成,并沉积在管壁上,但沉积物也可能被燃油冲刷而随燃油流动,如图 11 所示^[25]。结焦沉积物的增长速率是由沉积速率和去除速率的差值决定的。总的来说,结焦沉积过程是一种动态的且不稳定的过程。对于传统加工工艺制造的管路而言,其内壁较为光滑,结焦沉积物即使被冲刷也不易附着在下游管壁。而增材制造管路恰与之相反,其内表面粗糙度较大,结焦沉积物易于附着。因此,在环境温度为 722 K 和 919 K 的工况中出现的第 3 个峰值可能是结焦沉积物被冲刷到下游而导致的。由图 10 可知,结焦在螺旋圆管中的分布较为均匀,没有特别突出的峰值,这可能是由螺旋弯曲产生的离心力导致的,这也与 Fu 等的试验结果相似^[26]。



图 11 光滑管路内结焦过程^[25]

Fig.11 Coking process in smooth tubes^[25]

图 12 体现了环境温度对总结焦量的影响。由图可知,环境温度对总结焦量的影响十分显著。环境温度分别为 722 K 和 919 K 时, T_{ws} 相差 100 K,

总结焦量增加了约 1.34 倍。另外,当 T_{w5} 从 440 K 增大到 500 K, T_{w5} 平均每升高 1 K,其总结焦量增大 0.235 mg;当 T_{w5} 从 500 K 增大到 540 K, T_{w5} 平均每升高 1 K,其总结焦量增大 0.295 mg。

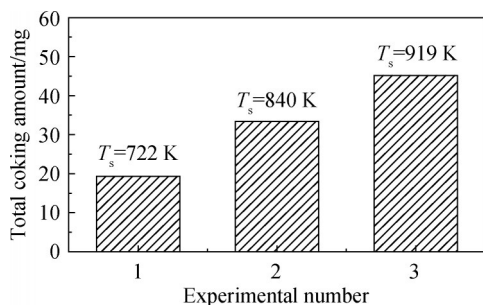


图 12 环境温度对总结焦量的影响 ($Re_{in}=3\ 000$, $t=4\ h$)

Fig.12 Effects of ambient temperature on total coking amount ($Re_{in}=3\ 000$, $t=4\ h$)

2.3 入口雷诺数对 RP-3 航空煤油结焦特性的影响

燃油雷诺数大小与流动状态密切相关,而流动状态则影响着传质和传热过程。由表 2 可知,为使 T_{w5} 稳定在 500 K,同等条件下入口雷诺数越大,所需的炉温值越高,这也反映了燃油与壁面的换热随着入口雷诺数的增大而增强。

入口雷诺数对试验件沿程结焦速率和壁温的影响如图 13 所示。由图可知,总体上,当入口雷诺数从 500 增大到 1 000 再到 3 000,沿程结焦速率先增加后减少。当入口雷诺数为 500 时,流量较小,燃油流动产生的离心力和换热都较小,故壁温随着轴向距离的增加而增大。当入口雷诺数增大到 1 000 时,虽然壁温的总体趋势仍是随轴向距离的增加而增大,但由于此时离心力和换热都随着流量的增大而增强,在某些位置出现壁温下降的情况,当入口雷诺数增大到 3 000 时,这种情况更加明显。虽然入口雷诺数为 500 时燃油在管内的停留时间较长,结焦反应的时间也相应较长,但燃油与壁面的换热和传质都较弱,因此总体上入口雷诺数为 1 000 时的结焦速率比入口雷诺数为 500 时的大。当入口雷诺数进一步增大到 3 000 时,虽然燃油与壁面的换热和传质都进一步增强,但燃油在管内的停留时间进一步缩短,这意味着结焦反应的时间也相应地减少。此外,燃油流速的增大会使燃油对壁面沉积物的冲刷作用增强,这不利于结焦的沉积。同时,流速较大时,结焦前驱物向下游扩散的速度以及中心流和近壁面流体之间的速度梯度也较大,导致部分结焦前驱物尚

未反应就随燃油流向出口^[27]。在多种因素的共同作用下,总体上入口雷诺数为 3 000 工况下的结焦速率少于入口雷诺数为 1 000 的工况。

3 个工况的沿程结焦速率均存在两个峰值。其中,入口雷诺数为 3 000 工况的结焦峰值出现位置较入口雷诺数为 1 000 的靠前,主要原因是入口雷诺数为 3 000 时,燃油的传热和传质能力更强。此外,结焦速率分布曲线亦没有特别突出的峰值,这与不同环境温度下 RP-3 航空煤油的结焦特性相似。

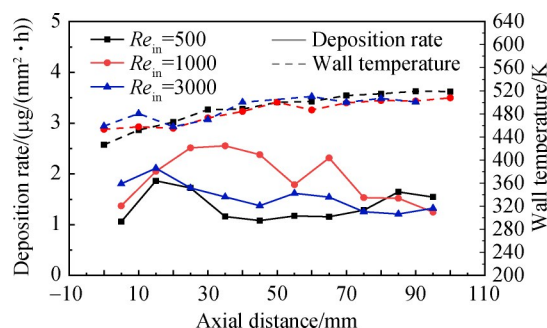


图 13 入口雷诺数对结焦速率和壁温的影响

($T_{w5}=500\ K$, $t=4\ h$)

Fig.13 Effects of Reynolds number on deposition rate and wall temperature ($T_{w5}=500\ K$, $t=4\ h$)

图 14 为总结焦量随入口雷诺数的变化,由图 14 可以更加直观地看出口雷诺数对结焦量的影响,即总结焦量随着入口雷诺数的增大而呈现出先增大后减小的变化趋势。

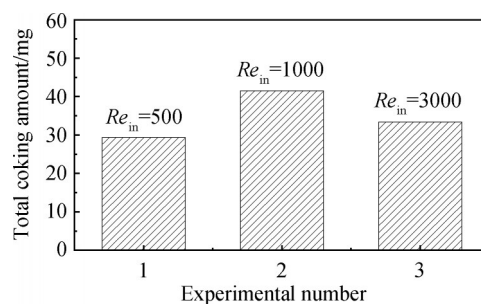


图 14 入口雷诺数对总结焦量的影响

($T_{w5}=500\ K$, $t=4\ h$)

Fig.14 Effects of Reynolds number on total coking amount ($T_{w5}=500\ K$, $t=4\ h$)

2.4 磨粒流处理工艺对 RP-3 航空煤油结焦特性的影响

为进一步探究螺旋圆管内表面粗糙程度对 RP-3 航空煤油结焦特性的影响,使用磨粒流处理工艺对螺旋圆管内表面进行处理,以降低流道的

表面粗糙度,并进行试验,试验工况与基准工况相同。除了图5、图6的对比,磨粒流处理工艺对试验件内表面粗糙度的影响还体现在测试段进出口压差上。由表3可知,对于未经处理的试验件,测试段进出口压差皆在75 kPa左右,而经磨粒流处理后,测试段进出口压差降至约55 kPa,这说明经磨粒流处理后试验件内表面的粗糙程度降低。

由表4可知,试验参数相同时,试验件经磨粒流处理后, T_{w5} 稳定在500 K时所需炉温减小,表明燃油与壁面的换热减弱。图15为磨粒流处理后和基准工况下试验件的沿程结焦速率和壁温。由图可知,磨粒流处理后的试验件沿程壁温更加均匀。这可能是因为采用磨粒流处理后,试验件内表面相对光滑,近壁处燃油的湍流度减小,燃油的换热减小,因此试验件沿程壁温更加均匀。此外,总体上,采用磨粒流处理后,试验件结焦速率大于基准工况下的结焦速率。对于内壁相对光滑的管路,在结焦反应初期,结焦沉积物不易附着,结焦沉积速度较为缓慢^[26]。随着反应时间的增加,结焦沉积物将在管壁形成凸起,使管壁表面粗糙度增加,近壁处的燃油在流经这些凸起时易形成涡旋,导致停留时间增加,更易形成结焦。此外,由于结焦沉积物为多孔结构,燃油流经的总表面积随总结焦量的增加而增加^[4]。因此,随着反应时间的增加,总结焦量、总结焦量的增长速率和结焦速率都变大。对于未经处理的管路,其内表面存在许多凸起和凹坑,故在试验初期,结焦沉积物容易附着,结焦沉积速度较快。由于结焦沉积物可能附着在凹坑中,故随着反应的进行,结焦沉积物对管壁表面粗糙度和燃油流经的总表面积的增益作用较小,甚至起到相反的作用。因此,随着反应时间的增加,总结焦量仍增大,但总结焦量的增长速率和结焦速率变小。

总的来说,在结焦反应开始后一段时间内,随着反应时间的增加,磨粒流处理后的试验件的总结焦量、总结焦量的增长速率和结焦速率都增大;而未经处理的试验件的总结焦量仍增大,但总结焦量的增长速率和结焦速率都变小。因此,在4 h试验结束后,出现了如图15所示的结果。磨粒流处理后的试验件结焦总量约为39.1 mg,约为未经处理试验件结焦总量的1.17倍,说明对试验件内表面进行磨粒流处理后,燃油的总结焦量增大。

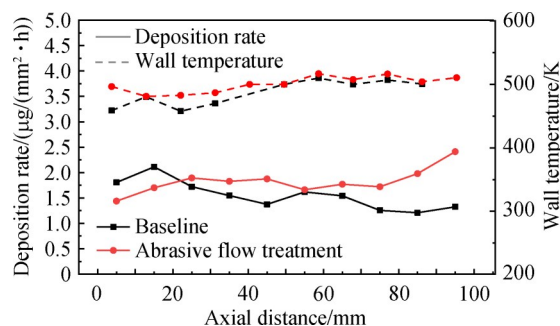


图15 磨粒流处理工艺对结焦速率和壁温的影响

($Re_m=3\ 000$, $t=4\ h$)

Fig.15 Effects of abrasive flow treatment on deposition rate and wall temperature ($Re_m=3\ 000$, $t=4\ h$)

3 结 论

本文通过试验研究了环境温度、入口雷诺数和磨粒流处理工艺对燃油在增材制造螺旋圆管中结焦特性的影响,根据以上试验结果和分析,得出如下结论:

- 1) 静止条件下,燃油的结焦主要受到燃油温度和燃油中溶解氧含量的共同影响。环境温度越高,则燃油温度越高,结焦速率和总结焦量越大。
- 2) 燃油流动时,试验件的沿程结焦速率分布曲线普遍存在两个峰值,但由于离心力的存在,其沿程结焦速率分布比较均匀,没有特别突出的峰值。
- 3) 燃油流动状态一致时, T_{w5} 对于总结焦量的增大存在积极的非线性影响。
- 4) 当入口雷诺数和加热时间一定时,燃油结焦速率和总结焦量随环境温度的增大而增加;环境温度不同,结焦峰值位置不完全一致。
- 5) 当 T_{w5} 和加热时间一定时,燃油结焦速率和总结焦量随入口雷诺数的增大呈现出先增大后减少的变化趋势。
- 6) 采用磨粒流处理后,试验件内表面粗糙度减小,但总体上燃油的结焦速率和总结焦量都增大。这表明对试验件内表面进行磨粒流处理不利于结焦沉积的减少。

参考文献:

- [1] 廉筱纯,吴虎.航空发动机原理[M].西安:西北工业大学出版社,2005.
- [2] BRUENING G B, CHANG W S. Cooled cooling air systems for turbine thermal management[R]. Indianapolis, Indiana: International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, 1999.

- [3] CHARLES E B, DAVID A B, STEPHEN M C, et al. Research on aviation fuel instability[R]. Cesme, Turkey: AGARD Propulsion and Energetics Panel Symposium on Combustion Problems in Turbine Engines, 1983.
- [4] HAZLETT R N. Thermal oxidation stability of aviation turbine fuels[M]. Philadelphia, US: American Society for Testing and Materials, 1991.
- [5] CHIN J S, LEFEBVRE A H. Temperature effects on fuel thermal stability[R]. Orlando, US: International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, 1991.
- [6] TAO Zhi, FU Yanchen, XU Guoqiang, et al. Experimental study on influences of physical factors to supercritical RP-3 surface and liquid-space thermal oxidation coking[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(9):6098-6106.
- [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] 刘天池, 范育新, 赵世龙, 等. 高温条件下 RP-3 航空煤油的结焦特性[J]. 航空动力学报, 2020, 35(2):348-357.
- LIU Tianchi, FAN Yuxin, ZHAO Shilong, et al. Deposition characteristics of RP-3 aviation kerosene under high temperature conditions[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(2): 348-357. (in Chinese)
- [9] 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(4):741-746.
- [10] COMPANY G E. Fuel nozzle for a gas turbine engine: US10591164b2[P]. 2020-03-17.
- [11] FU Yanchen, XU Guoqiang, WEN Jie, et al. Thermal oxidation coking of aviation kerosene RP-3 at supercritical pressure in helical tubes[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128:1186-1195.
- [12] PEI Xinyan, HOU Lingyun. Secondary flow and oxidation coking deposition of aviation fuel[J]. Fuel, 2016, 167:68-74.
- [13] 杨治, 张净玉, 姬鹏飞, 等. 典型管路 RP-3 航空煤油热氧化结焦特性试验研究[J]. 推进技术, 2020, 41(10):2374-2381.
- YANG Zhi, ZHANG Jingyu, JI Pengfei, et al. Experimental study on autoxidation coking characteristics of aviation kerosene RP-3 in typical pipeline[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(10):2374-2381. (in Chinese)
- [14] 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]. 南京:南京航空航天大学, 2018.
- JI Pengfei. Research on autoxidation coking characteristics of aviation kerosene RP-3 in typical pipeline[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [15] TAO Zhi, FU Yanchen, XU Guoqiang, et al. Thermal and element analyses for supercritical RP-3 surface coke deposition under stable and vibration conditions[J]. Energy & Fuels, 2015, 29(3):2006-2013.
- [16] JONES E G. Autoxidation of aviation fuels in heated tubes: surface effects[J]. Energy & Fuels, 1996, 10:831-836.
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] 常坤, 梁恩泉, 张韧, 等. 金属材料增材制造及其在民用航空领域的应用研究现状[J]. 材料导报, 2021, 35(3):3176-3182.
- CHANG Kun, LIANG Enquan, ZHANG Ren, et al. Status of metal additive manufacturing and its application research in the field of civil aviation[J]. Materials Reports, 2021, 35(3): 3176-3182. (in Chinese)
- [20] 荀柏秋, 李琦, 赵乌恩. 高温材料在燃气轮机中的应用和发展[J]. 热能动力工程, 2004, 19(5):447-449.
- XUN Baiqiu, LI Qi, ZHAO Wuen. Application and development of high-temperature alloys for gas turbines[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2004, 19(5): 447-449. (in Chinese)
- [21] TUCHIDA K, WATHANYU K, SURINPHONG S. Thermal oxidation behavior of TiAlCrSiN and AlCrTiN films on HastelloyX[J]. Advanced Materials Research, 2012, 486: 400-405.
- [22] WANG Haijun, LUO Yushan, GU Hongfang, et al. Experimental investigation on heat transfer and pressure drop of kerosene at supercritical pressure in square and circular tube with artificial roughness[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 42:16-24.
- [23] 姚燕生, 周瑞根, 张成林, 等. 增材制造复杂金属构件表面抛光技术[EB/OL]. [2021-05-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20210524.2051.015.html>.
- [24] GIOVANETTI A J, SZETELAT E J. Long-term deposit formation in aviation turbine fuel at elevated temperature[J]. Journal of Propulsion and Power, 1986, 2(5):450-456.
- [25] LIU Zhaohui, PAN Hui, FENG Song, et al. Dynamic behaviors of coking process during pyrolysis of China aviation kerosene RP-3[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 91:408-416.
- [26] FU Yanchen, WEN Jie, TAO Zhi, et al. Surface coking deposition influences on flow and heat transfer of supercritical hydrocarbon fuel in helical tubes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 85:257-265.
- [27] 周伟星, 韩之雄. 关键物理因素对 RP-3 航空煤油氧化结焦影响的数值研究[R]. 福建 厦门: 2020 年中国工程热物理学会燃烧学年会, 2020.