

文章编号:1000-8055(2013)04-0832-06

超临界压力下航空煤油 RP-3 壁面结焦特性 对换热的影响

袁立公, 邓宏武, 徐国强, 贾洲侠, 李一帆

(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: 研究了超临界压力下航空煤油(RP-3)在微细管内流动过程中结焦对换热的影响规律. 实验中系统压力保持为 5 MPa, 燃油质量流量为 3 g/s, 燃油溶解氧达到饱和, 实验段进出口油温分别为 127 °C 和 450 °C, 实验时间为 60 min, 并利用“称质法”获得煤油结焦量. 结果表明: 由于壁面结焦的差异使得换热特性沿实验段可分为 3 个区域: 进口低温段的传热稳定区、结焦峰值处的传热恶化区和出口高温段的短期强化区. 进口低温段结焦量较少, 对换热的影响可以忽略; 结焦峰值处由于其结焦迅速且量大致使管内传热热阻突增, 传热系数下降 36.1% 故出现传热恶化; 高温段出现短期强化是由于结焦微粒附着于管壁, 增加了其粗糙度而导致近壁面处流体湍动能增大以及由于近壁面高温区域煤油裂解结焦而产生化学吸热量, 进而强化换热. 随着时间的推移, 结焦量不断增多, 结焦热阻增加的效应抵消并超过以上两种因素的影响, 因此又出现传热恶化.

关 键 词: 超临界; 航空煤油 RP-3; 微细管; 结焦; 换热

中图分类号: V312

文献标志码: A

Effects of RP-3 coke deposition on heat transfer under supercritical pressure

YUAN Li-gong, DENG Hong-wu, XU Guo-qiang, JIA Zhou-xia, LI Yi-fan

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The effect of coking deposition of RP-3 on heat transfer was investigated experimentally. The fuel flowing through miniature tube was heated from 127 °C to 450 °C at 5 MPa, and the mass flow rate was maintained at 3 g/s. The surface coking deposition was obtained by weighting method. Test results show that the effect of coking deposition on heat transfer could be divided into three regions due to differences of deposition: stable heat transfer region at low fuel temperature, deteriorated heat transfer region at peak coking deposition position and short term enhanced heat transfer region at high fuel temperature. Due to lower fuel temperature at the entrance region, the coking deposition amount was tiny and its effect on heat transfer could be ignored. At peak coking region, heat transfer resistance increased sharply with coke deposition, heat transfer coefficient decreased by 36.1%, and heat transfer deterioration was observed in the whole time. In addition, short term enhanced heat transfer occurred due to the roughness increase by coke particles adhered to the

收稿日期: 2012-05-05

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130417.1353.201304.832_016.html

基金项目: 国家自然科学基金(50676005)

作者简介: 袁立公(1986—), 男, 辽宁丹东人, 硕士生, 主要从事传热传质及超临界碳氢燃料的流动与换热研究.

inner surface of the pipe and chemical heat absorption caused by cracking coke deposition. As more and more coke particles adhered, the increasing heat transfer resistance resulted in heat transfer deterioration.

Key words: supercritical pressure; aviation kerosene RP-3; miniature pipe; coke deposition; heat transfer

未来先进军用航空发动机将工作在更高的增压比和更高的涡轮前温度下,这将大大增加涡轮叶片等高温部件的热负荷,同时严重影响冷却空气的冷却品质。为了满足增压比和涡轮前温度持续提高的需求,在继续研究新型冷却结构的同时,国内外研究机构广泛采用 CCA (cool cooling air)^[1-2] 技术:飞行器自身携带的碳氢燃料在喷入燃烧室之前将首先作为冷源,冷却压气机中引出的高温部件冷却空气,吸热后再喷入燃烧室,从而达到提高冷却空气品质以及提高能量利用率的目的。燃油经吸热升温后有利于雾化和燃烧。然而,在超临界压力下,碳氢燃料温度升高到一定值时,其组分会发生一系列化学反应产生结焦^[3-5]。结焦在换热表面大量的沉积将大幅降低壁面与燃料之间的传热效率,可导致冷却空气冷却能力的降低,造成涡轮等部件超温;结焦在流路中的沉积会导致阀门等控制元件的黏滞,影响发动机的可操控性,大幅增加维护费用,甚至可堵塞输油管路以及燃烧室喷嘴,酿成飞行事故。

结焦的成份非常复杂,其导热性能非常差,导热系数 $\lambda = 0.038 \sim 0.19 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,即使结焦量不多,对管内传热的影响也十分显著^[6]。美国国家航空航天局(NASA)的研究人员^[7]对直径为 0.397 cm,长为 1.37 m 的镍铬合金管进行了单管亚临界换热实验,采用电加实验段,加热功率为

2840 W/m^2 。实验时间为 1000 h,实验工质分别为空气饱和的 Jet-A 和氮气喷淋除氧的 Jet-A。结果表明:管内的传热系数均下降了 40%。胡志宏等^[8]在高温流下研究了超临界压力煤油流过小管的传热特性,结果表明:当内壁温达到拟临界温度时有拟沸腾现象发生,进一步提高热负荷会出现传热恶化,在极高的热负荷下会出现二次传热强化。张斌等^[9]提出了超临界压力碳氢燃料微细管内流动的强迫表面传热经验关系式,其平均拟合误差不超过 11%。

航空煤油作为航空发动机的再生冷却剂具有巨大的应用前景,为了保障发动机安全可靠、长时间地工作,研究超临界压力下航空煤油在微细管内壁面结焦特性对其换热的影响规律是十分必要。本文在超临界碳氢燃料流动结焦实验台上开展相关研究,系统压力为 5 MPa,煤油质量流量为 3 g/s。采用恒定热流的加热方式,将微细不锈钢管中的煤油从 127 °C 加热至 450 °C。在 60 min 的实验过程中观测结焦对换热的影响规律,旨在为应用于 CCA 系统中的空油换热器设计提供理论依据。

1 实验部分

1.1 实验装置简介

图 1 所示为超临界 RP-3 多功能实验台,整个系统可分为预处理系统、测量系统及冷却回收系统。

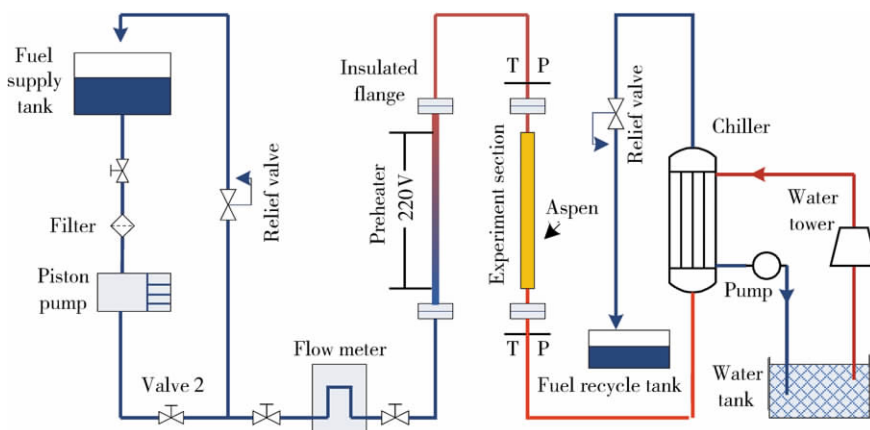


图 1 实验系统简化图

Fig. 1 Schematic of supercritical fluid system

不锈钢实验管段(管长 $L = 1\,800\text{ mm}$, 内径 $D_{\text{in}} = 1.8\text{ mm}$, 外径 $D_{\text{out}} = 2.2\text{ mm}$) 竖直安装, 外表面采用纳米绝热材料 Aspen 包裹, 可有效绝热. 实验中采用电加热, 加热功率最大为 20 kW . 热损失经标定, 其相对偏差低于 3% . 燃油贮存在油箱里经高压柱塞计量泵后其压力可达到 16 MPa . 燃油流量通过克里奥利质量流量计测量(型号 DMF-1), 测量精度为 $\pm 0.3\%$, 同时调节流量调节阀和背压阀可以实现系统流量稳定. 实验段出口压力以及进出口压差分别由安装在实验段出口处的绝对压力传感器及实验段两端的压力变送器测量得出, 其型号分别为 Rosemount 3051TA4 和 Rosemount 3051CD4, 测量精度为 $\pm 0.15\%$. 沿着加热管长方向不等距布置了 25 对 0.1 mm 标准 K 型热电偶监测壁温, 测量精度为 $\pm 0.5\%$.

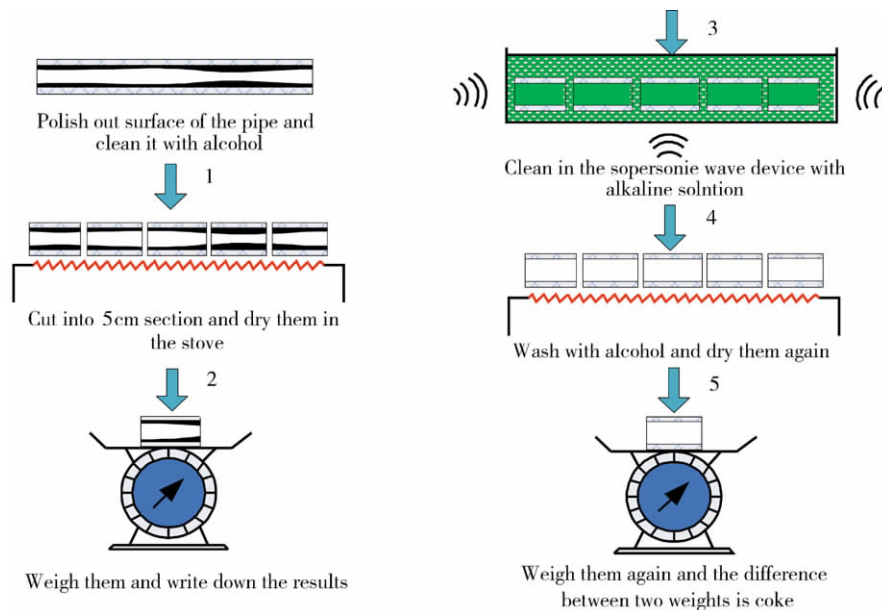


图2 称质法测量结焦量示意

Fig. 2 Schematic of weighing coke method

2 数据结果与讨论

2.1 数据处理

管内局部传热系数 K 采用下式计算:

$$K = \frac{q_x}{t_{w,x,\text{in}} - t_{b,x}} \quad (1)$$

式(1)中 $t_{w,x,\text{in}}$ 为实验管内壁面局部温度, 由具有内热源的一维圆筒壁导热公式计算, 管电阻产生的加热热流为体热源. q_x 为有效壁面热流

$$q_x = \frac{I^2 \rho(t) / [\pi(d_o^2 - d_i^2)]}{\pi d} - q_{\text{loss},x} \quad (2)$$

式中 $\rho(t)$ 为不锈钢的电阻率, $q_{\text{loss},x}$ 为管外壁面的热损失, 在不通油的情况下对实验段空管进行通

燃油的进出口温度由标定过的 K 型铠装热电偶测量, 测量精度为 $\pm 0.6\%$.

1.2 测焦方法

测量结焦方式主要包括了烧炭法^[10-12]、称质法^[13]和在线石英微量天平^[14]. 本实验采用称质法测量结焦, 如图2所示. 测量结焦采用测量精度为 0.2 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 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 的电炉中烘烤 1 h 后取出, 第1次称质. 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2次称质. 通过对比清洗前后管段减重变化获得管壁结焦分布情况.

电加热, d_o 为不锈钢管外径, d_i 为内径. 在环境温度和保温措施一定的条件下, 实验管温度达到稳定时, 不锈钢管壁发热功率与管外损失功率相等. 改变加热功率即可得其与温差 Δt (外壁温度与环境温度之差) 的对应关系, 管内局部油温计算

$$q_{\text{loss},x} = 188.12 + 13.24\Delta t + 0.037\Delta t^2 \quad (3)$$

实验过程中保持 RP-3 进口温度 $t_{\text{in}} = 127\text{ }^\circ\text{C}$ 恒定, 管内油温分布可根据管壁加热功率及实验获取的 RP-3 焓差曲线推算得到. 实验管 x 截面处流体质量平均温度计算方程式如下:

$$t_{b,x} = H^{-1} \left[\frac{P_x}{\dot{m}} + h(t_{\text{in}}) \right] \quad (4)$$

其中 P_x 为进口到 x 截面处的电加热功率(单位为 kW)

$$P_x = I^2 \int_0^x \left[\rho(t) \frac{A}{x} \right] dx - \pi d_0 \int_0^x q_{\text{loss}} dx \quad (5)$$

其中管道截面积 A 为

$$A = \frac{\pi(d_o^2 - d_i^2)}{4} \times 10^{-6} \quad (6)$$

式中 $\dot{m}$ 为 RP-3 质量流量(单位为 kg/s).

2.2 结果讨论

图 3 给出了 60 min 结焦实验的结焦分布规律. 结焦量沿管长先增大后减小, 结焦峰值区域分布在管长的 80~120 cm 范围内, 靠近出口处(140~160 cm)出现了二次峰值.

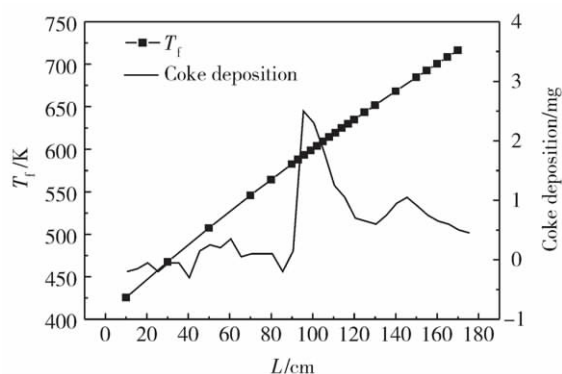


图 3 结焦实验油温与结焦分布对比图

Fig. 3 Comparison between fuel temperature variation and coke distribution

由图 4 可知, 在结焦量较低的区域壁温曲线束基本重合, 结焦峰值区域以后外壁温曲线束呈发散状, 峰值区域更为明显, 与初始时刻的曲线有较大偏差.

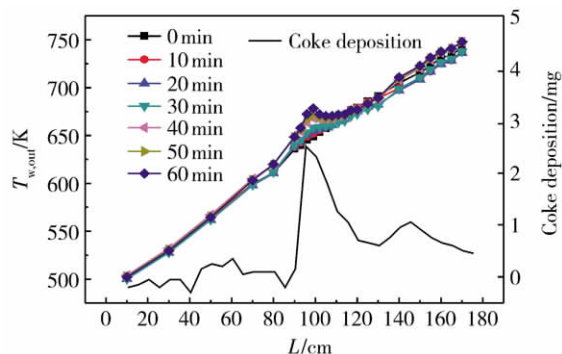


图 4 外壁温变化和结焦分布对比

Fig. 4 Comparison between out wall temperature variation and coke distribution

图 5 所示为传热系数不同时间沿管长的变化, 其发散趋势和外壁温变化基本一致. 自结焦峰值以后传热系数变化较大, 曲线发散, 与初始时刻的曲线有较大偏差.

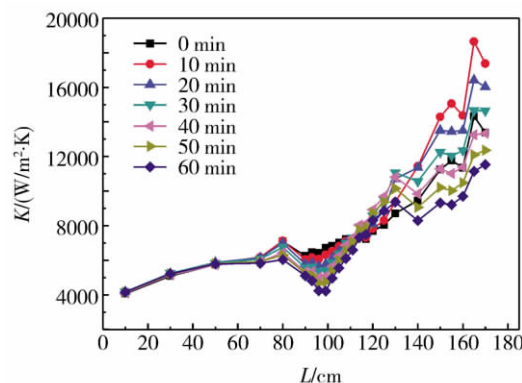


图 5 传热系数沿管长的变化

Fig. 5 Heat transfer coefficient variation with axial position under different heat flux

在实验的过程中, 系统压力、系统流量、热流密度、进出口油温和管路内径皆为常量. 因此管路外壁温以及传热系数与初始时刻的曲线的背离只能是结焦产生引起的. 实验开始时换热情况稳定, 同一点的壁温变化较小. 随着时间延续, 结焦大量产生并沉积, 热阻逐渐增大, 阻碍了热量由壁面向流体中传递, 外壁温度随时间推移而不断上升. 壁温变化直接影响换热, 因此结焦对换热的影响不能忽略.

图 6 所示为管路进口低温区域(400~550 K)传热系数随时间变化规律, 该范围内外壁温相对较低, 换热情况也较为稳定, 传热系数随时间的变化均在 10% 以内. 图 7 所示为结焦峰值位置(550~673 K)附近传热系数变化规律, 其传热系数自实验开始即体现出快速下降的趋势, 尤其以峰值最为明显, 仅为起始时刻的 63.9%, 可见传热恶化现象严重, 称该区域为峰值恶化区. 图 8 和图 9 为管路的出口高温区域(673~723 K)传热系数随时间的变化, 传热系数呈现先增后降的趋势, 说明在一定时间内出现了换热强化现象, 但持续时间短, 很快就转变为与峰值恶化区相类似的情况, 并且对比各点传热系数达到峰值所对应的时间可以看出, 沿主流方向, 越靠近下游位置越早到达强化极限.

由上可知, 传热系数沿管长大致分为 3 个区域: 传热稳定区, 如图 6; 峰值恶化区, 如图 7; 短期强化区, 如图 8 和图 9. 不论是峰值恶化区的传热

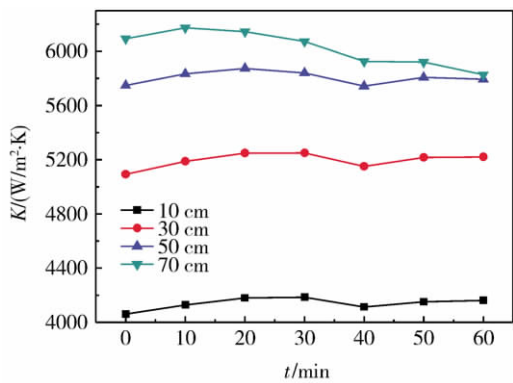


图 6 传热系数随时间变化图 (10~70 cm)

Fig. 6 Time dependent heat transfer coefficient variation (10~70 cm)

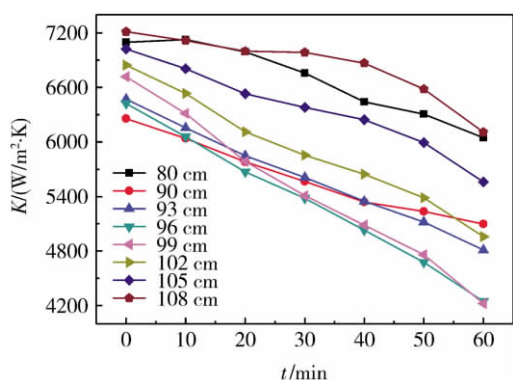


图 7 传热系数随时间变化图 (80~108 cm)

Fig. 7 Time dependent heat transfer coefficient variation (80~108 cm)

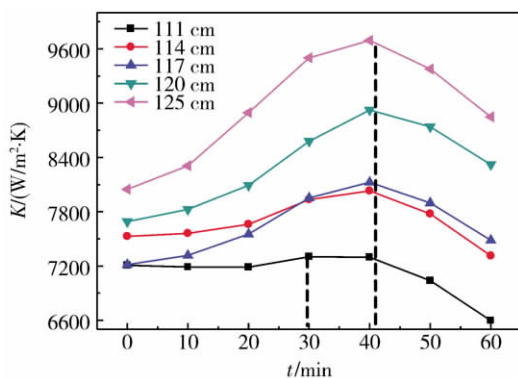


图 8 传热系数随时间变化图 (114~125 cm)

Fig. 8 Time dependent heat transfer coefficient variation (114~125 cm)

衰减,还是短期强化区的先增后降现象都是出自于结焦的影响。进口段由于油温较低,氧化结焦反应速率较低,结焦量较少,传热稳定。在峰值恶化区内,油温超过 550 K,碳氢分子活性增加,与溶解氧反应迅速且充分,大量的焦体在到达这一区域后迅速的聚合沉积并附着于管路内壁,油温和

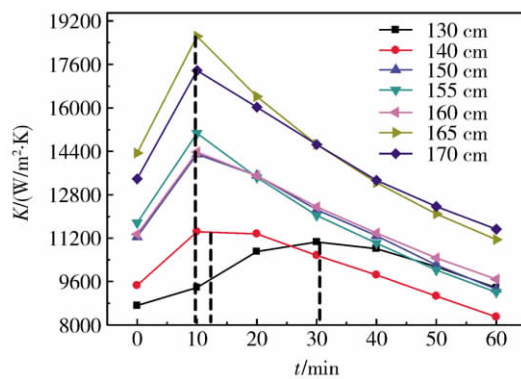


图 9 传热系数随时间变化图 (130~170 cm)

Fig. 9 Time dependent heat transfer coefficient variation (130~170 cm)

氧浓度共同作用使得热氧化结焦在此达到峰值^[15]。焦体向壁面沉积的过程中同时改变着传热热阻和内壁面粗糙度(即对管内流体的扰动),因反应速度很快,热阻瞬间增大,扰动效果被淹没,传热严重恶化。经过结焦峰值区域后,作为反应物之一的液体空间中的溶解氧消耗殆尽,热氧化结焦反应速度降低,由于油温较高,热裂解结焦出现,其综合结焦速率比峰值处低,因而出现了有别于主峰的次峰现象。在该域内出现了传热的强化,主要有两个原因:一方面在管壁附着的小颗粒焦体使得壁面粗糙度增大,对管内煤油的扰动增大;另一方面,该区域内发生裂解结焦,化学吸热量增大,两个因素共同形成了换热的强化现象。而随着时间的推移,结焦量增多,初期结焦形成的间隙被填补,经过一段时间的沉积作用,热阻增大,从而出现类似峰值恶化区域的衰减现象。越靠近下游传热系数越先开始衰减,因为越靠近出口,油温越高,裂解结焦速度越大。

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,在一定质量流量、进出口温度和系统压力下研究了航空煤油 RP-3 在细圆管内结焦对换热的影响规律。在 60 min 的实验过程中,结焦对换热的影响规律沿管路轴向是不同的,其具体结论如下:

1) 跨临界航空煤油 RP-3 在微细管内壁面结焦对其换热有着重要的、不可忽视的影响。壁面结焦的差异使得换热特性沿试验段可分为 3 个区域:进口低温段的传热稳定区、结焦峰值处的传热恶化区和出口高温段的短期强化区。

2) 在结焦峰值区域(550~673 K),结焦速率

较快,焦体在壁面迅速沉积,热阻大幅增加,因此出现了传热系数大幅降低现象,传热系数最高可下降 36.1%,传热恶化严重。

3) 在高油温区域(673~723 K),由于油温较高,且液体中氧含量很低,氧化结焦速率锐减,裂解结焦开始出现。管内粗糙度增大导致近壁面湍动能的增加及化学吸热量增加,出现短期换热强化现象。

参考文献:

- [1] Bruening G B, Chang W S. Cooled cooling air systems for turbine thermal management[A]. ASME Paper 1999-GT-14, 1999.
- [2] Sobel D R, Spadaccini L J. Hydrocarbon fuel cooling technologies for advanced propulsion[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1997, 119(2): 344-351.
- [3] Edwards T, Zabarnick S. Supercritical fuel deposition mechanisms[J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1993, 32(10): 3117-3122.
- [4] Shawn P H, Steven I. Oxidation of jet fuels and the formation of deposits[J]. Fuel, 1994, 73(1): 35-43.
- [5] Ömer G, Rudnick L R, Schobert H H. Effect of the reaction temperature and fuel treatment on the deposit formation of jet fuels[J]. Energy & Fuels, 2008, 22(1): 433-439.
- [6] Strawson H, Lewis A. Predicting fuel requirements for the concorde[R]. SAE Paper 680734, 1968.
- [7] Hahne E, Neumann R. Boiling-like phenomena in free-convection heat-transfer at supercritical pressures [J]. Wärme-und Stoffübertragung, 1981, 15(3): 171-180.
- [8] 胡志宏, 陈听宽, 罗毓珊, 等. 超临界压力下煤油传热特性试验研究[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(9): 33-37. HU Zhihong, CHEN Tingkuan, LUO Yushan, et al. Heat transfer characteristics of kerosene at supercritical pressure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(9): 33-37. (in Chinese)
- [9] 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的换热特性[J]. 航空动力学报, 2012, 27(3): 595-603. ZHANG Bin, ZHANG Chunben, DENG Hongwu, et al. Heat transfer characteristics of hydrocarbon fuel at supercritical pressure in vertical circular tubes[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(3): 595-603. (in Chinese)
- [10] 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, 11(5): 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, 11(5): 2472-2478. (in Chinese)
- [11] Alexander V, Oierre J M, Brian A K. Determination of coking rate in jet fuel[J]. Combustion science and technology, 1981, 26(3/4): 171-175.
- [12] Heneghan S P. Static tests of jet fuel thermal and oxidative stability[J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9(1): 5-9.
- [13] Orhan A, Semih E. 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.
- [14] 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.
- [15] 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, 2012, 27(3): 595-603. (in Chinese)