

DOI: 10.7652/xjtuxb201607002

航空煤油 RP-3 热裂解结焦流动换热特性实验研究

潘辉, 冯松, 刘朝晖, 毕勤成

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了掌握超燃冲压发动机再生式热防护结构中结焦对传热的影响,在压力为 3 MPa,质量流量为 $0.5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$,热流密度分别为 325、365 和 $374 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的实验条件下,对 $\Phi 3 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的高温合金钢管内航空煤油 RP-3 热裂解结焦过程的流动和换热特性进行了研究,并比较了结焦前后管内对流换热特性的差异。结焦过程中试验件压降出现了突然降低的现象,随着结焦反应的进行,试验件外壁面温度在逐渐降低。分析得知:结焦是不稳定的过程,伴随着结焦产物的沉积与脱落,壁面温度越高结焦速率越快;结焦会在管道内壁形成多孔结构层,当近壁处流体温度接近或高于拟临界温度时,多孔层将会使超临界“拟沸腾”换热得到强化,然而当近壁处流体温度低于“拟沸腾”所需温度时,结焦层的热阻效应使传热发生恶化。

关键词: 航空煤油;结焦;流动;换热

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)07-0007-06

Experimental Investigation on the Flow and Heat Transfer Characteristics of Aviation Kerosene RP-3 During Thermal Pyrolysis Coking

PAN Hui, FENG Song, LIU Zhaohui, BI Qincheng

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The flow and heat transfer characteristics of aviation kerosene RP-3 during its pyrolysis coking in a $\Phi 3 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ high-temperature alloy steel tube were investigated to understand the influence of coking in the regenerative thermal protection structures of scramjet on heat transfer. Experiments were conducted at the pressure of 3 MPa, the mass flow rate of $0.5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ and the heat fluxes of 325, 365 and $374 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. The discrepancy of convection heat transfer characteristics in the tube before and after coking was discussed. It was found that there occurred an abrupt pressure drop in the test tube section during coking test and the external wall temperature was reduced gradually during the thermal pyrolysis. These results revealed that coking was an unstable process with the coke depositing and removing. The coking rate would increase with the wall temperature. Coking might form porous surface on the inner wall of the tube, which would enhance the pseudo boiling heat transfer under the supercritical pressure condition when the temperature of the fluid near the wall was close to or higher than the pseudo critical temperature. However, when the temperature of the fluid near the wall was too low to maintain pseudo boiling, a heat transfer deterioration would occur because of the thermal resistance effect of the coking layer.

收稿日期: 2015-11-16。 作者简介: 潘辉(1991—),男,博士生;毕勤成(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21306147);中国博士后科学基金资助项目(2013M532044)。

网络出版时间: 2016-04-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160419.1625.006.html>

Keywords: aviation kerosene; coking; flow; heat transfer

超燃冲压发动机的热防护问题已成为制约发动机发展的瓶颈,再生式冷却技术^[1]作为发动机热防护的主要手段近些年受到了广泛关注。吸热型碳氢燃料流经发动机壁面对其进行冷却时,为了使燃料的化学热沉得到充分利用,燃料最终会被加热到近千度。碳氢燃料高温裂解的同时产生结焦^[2],既增加了燃料流动的阻力,也阻碍了碳氢燃料和通道内壁的换热,严重时甚至堵塞通道,影响飞行器的安全。

RP-3 作为航空燃料的代表,其流动、换热和结焦特性在近些年得到了大量的研究。Tao 实验探索了超临界 RP-3 氧化结焦的影响因素,结果表明燃料温度对 RP-3 氧化结焦的影响比壁面温度的影响大^[3]。文献[4]研究了 RP-3 在超临界压力下氧化结焦对换热的影响,根据换热系数的变化将实验段分成传热稳定区、传热恶化区、短期强化区。王夕等人实验研究了超临界 RP-3 在不同的压力和雷诺数下,浮升力和热加速对管内换热的影响,并对现有经验关联式进行了修正^[5]。Qin 通过实验和模型研究了 RP-3 在并联管内流量分配的特性,发现在拟临界区和热裂解区存在不同的正反馈机理,并且增加压力对流量不均匀分配有抑制作用^[6]。

目前,对 RP-3 结焦特性的研究侧重于氧化结焦^[4,7-9]。碳氢燃料氧化结焦温度较低(400 ℃ 以下),然而当飞行器高速飞行(马赫数在 8 以上)时,未经冷却的发动机壁面温度将达到 3 000 ℃^[10],研究碳氢燃料热裂解结焦特性对于超燃冲压发动机的主动冷却更具有实用性价值。本文以航空煤油 RP-3 替代吸热型碳氢燃料,实验研究其在 3 MPa 压力下的 $\Phi 3\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 电加热高温合金钢管内裂解结焦过程中的流动和换热特性。

1 实验装置及测量方法

1.1 实验装置

实验系统如图 1 所示,RP-3 从燃料罐进入高压

恒流泵,经恒流泵加压后进入质量流量计,然后在预热段和结焦段中被加热到实验所需温度。结焦段后接有高温过滤器,防止结焦进入下游管路。裂解产物经换热器冷却后进入背压阀,通过调节背压阀来控制实验系统的压力,最后进入废液箱。预热段和结焦段的进出口装有 K 型铠装热电偶,用来测量管道内流体温度,结焦段进出口间装有压差传感器监测实验段结焦过程中的压差变化,实验系统的压力通过实验段出口处的压力传感器监测。

预热段和结焦段均为 $\Phi 3\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 高温合金钢管,结焦段总长度为 600 mm,有效加热长度为 500 mm。结焦段上下两侧壁面等距焊有 9 对热电偶,用以测量外壁面温度,测温点间的间隔为 50 mm,结焦段和预热段外包裹有保温棉以减小散热损失。

本研究实验工况如表 1 所示。实验中维持工质流量 $0.5\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$,结焦段出口压力 3 MPa,测试 RP-3 在不同热流密度下结焦过程中的流动和换热特性。进行结焦实验前,先测量结焦段入口为常温,出口温度分别为 100、200、300 和 400 ℃ 时的管内对流换热系数,然后控制结焦段热流密度恒定,并在此热流密度下维持 1 h。同时,观察结焦段压差的变化,如果压差增加到接近 1 MPa 或表现出飞速上升的趋势,则立即停止结焦实验,待系统冷却到常温后再次测量结焦段的管内对流换热系数。

表 1 实验工况表

工况 编号	流量/ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$	出口 压力/ MPa	入口 温度/ $^{\circ}\text{C}$	出口 温度/ $^{\circ}\text{C}$	热流 密度/ $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$	时间/ min
A	0.5	3	30.5	634.9	325	58.3
B	0.5	3	29.4	655.8	365	73.4
C	0.5	3	28.4	662.5	374	119.3

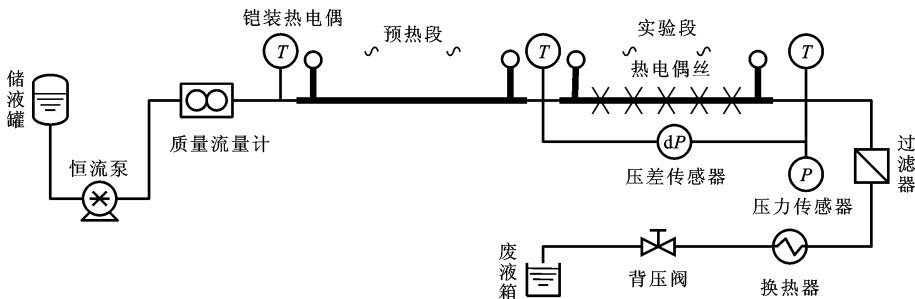


图 1 碳氢燃料结焦实验系统示意图

1.2 数据处理方法

内壁面温度可由测得的外壁面温度通过有内热源的稳态圆柱体导热方程计算得到,方程如下

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{\dot{q}}{\lambda} = 0 \quad (1)$$

边界条件

$$\left. \begin{aligned} T &= T_o & (r = r_o) \\ \frac{dT}{dr} &= -\frac{q_{\text{loss}}}{\lambda} & (r = r_o) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: T_o 为管壁上下两侧热电偶测得温度的平均值; q_{loss} 为外壁面散热热流,通过干烧法确定。

经推导得内壁温为

$$T_i = T_o + \frac{\dot{q}}{4\lambda} (r_o^2 - r_i^2) + \left(\frac{\dot{q} r_o^2}{2\lambda} - \frac{q_{\text{loss}} r_o}{\lambda} \right) \ln \left(\frac{r_i}{r_o} \right) \quad (3)$$

单位内热源表达式为

$$\dot{q} = \frac{UI}{\pi(r_o^2 - r_i^2)L} \quad (4)$$

各测温点处的局部换热系数为

$$h_{\text{local}} = \frac{q_{\text{eff}}}{T_i - T_b} \quad (5)$$

式中: q_{eff} 为除去散热损失的有效热流; T_b 为流体中心温度,由燃料热沉和吸热量差值得求。

本实验所用 K 型热电偶在 $0 \sim 500^\circ\text{C}$ 范围内时,精度为 0.5°C ,在 $500 \sim 800^\circ\text{C}$ 范围内时,精度为 1.0°C ;流量用 Emerson 质量流量计测量,不确定度为 2.04% ;压力和压差用 Rose Mount 3051 变送器测量,不确定度分别为 0.23% 和 1.36% ;热流密度不确定度为 6.17% ;传热系数不确定度为 6.49% 。

2 结果与讨论

2.1 结焦过程中的流动特性

本课题组之前的研究发现,结焦段压降与管道等效直径的 4 次方成反比,由于结焦所造成的管道内径的减小可以通过结焦段压降的变化定量反映出来^[11]。如图 2 所示,工况 A、B、C 中,随着结焦反应的进行,实验段压差逐渐增大。工况 C 中,实验段压降出现了两次突然降低,在实验条件不变的情况下,极可能是因为内壁面结焦发生了脱落,导致管道内径增大,压降减小。因此,结焦是一个不稳定的过程,伴随着结焦产物的随机沉积与脱落,本课题组在 $\Phi 6 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 不锈钢管内 RP-3 裂解结焦的实验^[12]中也发现了相似的规律。结焦颗粒沉积速率比脱落速率大,结焦逐渐增加,使管道内径逐渐减小,严重时将会使管道堵塞。

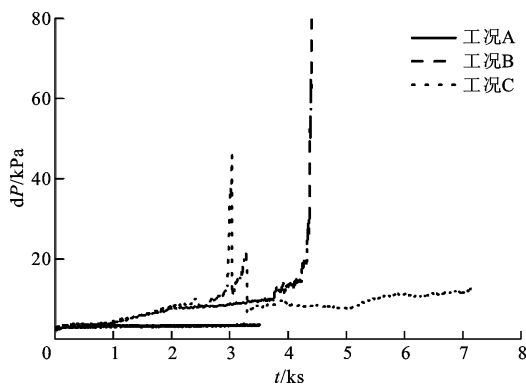


图 2 结焦过程中结焦段压差随时间的变化

结焦初始时刻不同热流密度下壁温 T_w 和流体温度 T_b 沿轴向的分布如图 3 所示。根据文献[13]的测量结果,RP-3 在 3 MPa 压力下拟临界温度为 399°C ,当流体温度接近拟临界温度时,流体密度和黏度会大幅度减小,使流体流速增大,边界层减薄,同时比热容也会迅速增大,流体吸热能力增强,对流传热得到强化。因此,在距入口 $15 \sim 30 \text{ cm}$ 的区间内,壁温沿轴向逐渐降低,并且随着热流密度的升高,壁温最低点向入口方向移动。不同热流密度下,流体温度沿轴向分布差异不大,而初始壁温分布却有明显的差异。工况 B 与工况 C 的初始壁温分布接近,工况 A 的初始壁温要低很多。同时,观察图 2 中的压差曲线,在压降迅速上升之前,工况 B 与工况 C 的压降变化趋势一致,而工况 A 的压降没明显变化。由此说明,结焦反应在不同热流密度下所表现出的差异主要由管道壁面温度引起,并且壁面温度越高结焦速率越快。

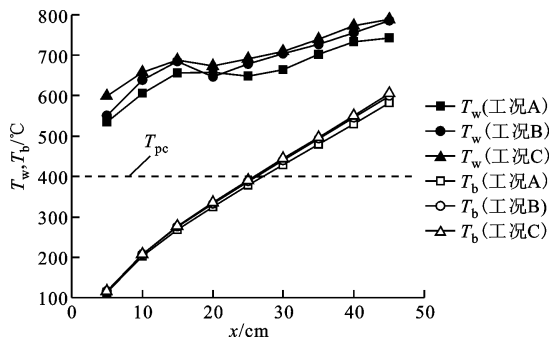


图 3 初始时刻壁温和流体温度沿轴向的分布

实验结束后,将试验件用线切割等距切为 20 小段并剖开,用电子显微镜观察结焦形态并用称量法测量结焦量,单位面积上的结焦量沿轴向的分布如图 4 所示。工况 A 热流密度较小,结焦主要集中在管道出口处,工况 B 试验件出口处结焦量几乎为工况 A 的 2 倍,导致实验后期管道压降出现飞速上升

的趋势。工况 C 中 20~30 cm 处结焦量偏低,可能是因为此处结焦发生了脱落。

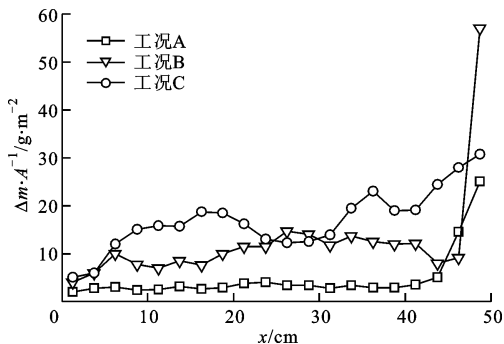
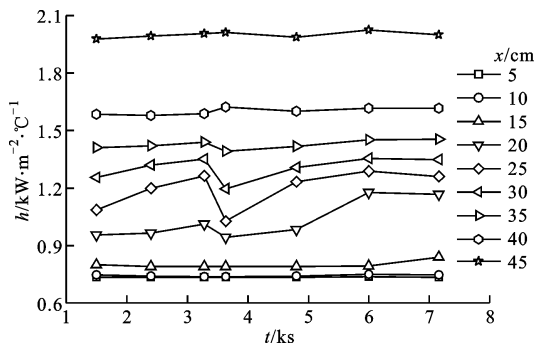


图4 单位面积结焦量沿轴向的分布

2.2 结焦过程中的换热特性

文献[4,14-15]报道,结焦层的导热系数很小,会增大壁面与管内流体间换热的热阻,导致传热恶化。但是,本文研究发现,在恒定热流密度下,随着结焦反应的进行,管外壁面温度逐渐降低,出现了传热强化的现象,如图5所示。

工况 A 中管道入口处,流体温度低,结焦量较少,对流换热系数随时间的变化不大,在距入口电极板 20~40 cm 处,对流换热系数随时间逐渐增大。工况 B 中较高的热流密度导致结焦向入口方向扩展,在距极板 15~30 cm 处出现传热强化,40~45 cm



(c) 工况 C

图5 结焦过程中换热系数随时间的变化

处出现传热恶化。工况 C 中出现了结焦脱落的现象,在结焦脱落后,3 636 s 时管道中部对流换热系数达到最低,然后又随着结焦反应的进行逐渐升高。该工况中 25 cm 处和 30 cm 处外壁面温度随时间的变化如图 6 所示,结焦脱落后壁温迅速升高,并且 25 cm 处壁温两次迅速升高的变化趋势与图 2 中压力两次迅速降低相对应,进一步验证了结焦对传热有强化作用,结焦脱落会使传热强化的现象消失。

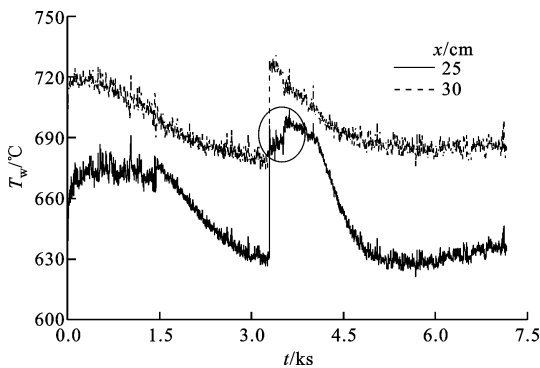
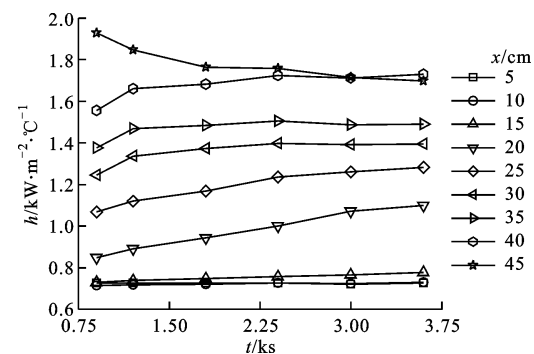
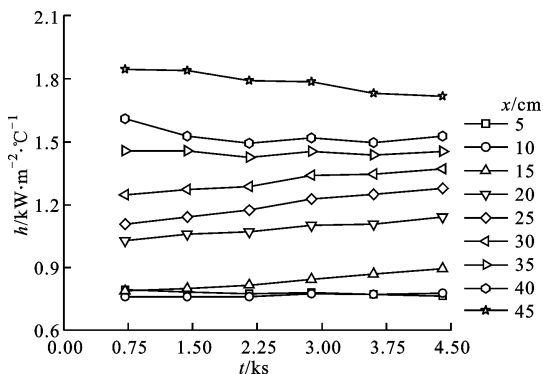


图6 结焦脱落对壁面温度变化的影响

结焦对传热的影响表现在两方面:一方面结焦导热系数小,增加了传热的热阻,使传热恶化;另一方面结焦在管道内壁形成多孔结构层,如图 7 所示。近些年人们研究发现,与光滑表面相比,水、液氮和有机制冷剂在烧结多孔表面上发生池沸腾时,气化核心增加,壁面过热度降低,沸腾换热系数与临界热流密度得到了提高^[16-18]。在超临界压力下,当流体发生“拟沸腾”换热时,多孔结构层内的液体受到壁面的加热,密度减小,与主流区流体形成较大的密度差,热流体扩散到主流区,同时由于多孔表面产生的抽吸力可以向多孔层内不断补充冷流体,增加了流体的扰动,因此结焦所形成的多孔内壁面使“拟沸腾”换热得到强化。随着热流密度的增大,发生“拟沸腾”的区间向入口方向移动。



(a) 工况 A



(b) 工况 B

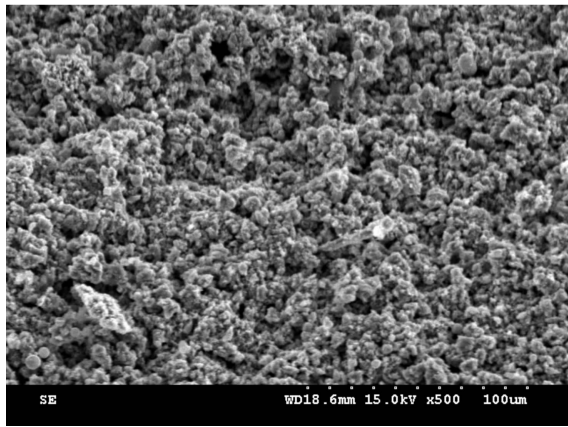
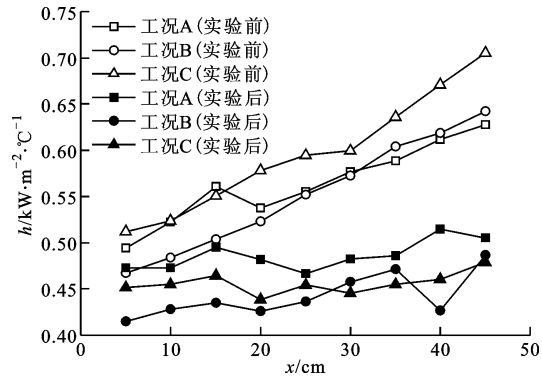


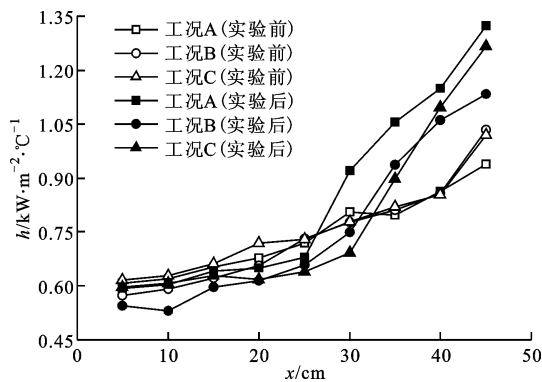
图 7 工况 B 中 $x=25\text{ cm}$ 处管道内壁面显微视图

2.3 结焦前后换热的差异

结焦前后,在压力为 3 MPa、流量为 0.5 g/s、结焦段入口为常温、出口流体温度分别为 200 和 400 °C 的条件下,燃料对流换热系数的差异如图 8 所示。



(a) 出口流体温度 $T_{\text{out}}=200\text{ °C}$



(b) 出口流体温度 $T_{\text{out}}=400\text{ °C}$

图 8 结焦前后燃料的传热系数对比

流体出口温度为 200 °C 时,结焦后的对流换热系数普遍比结焦前偏低。当流体出口温度达到 400 °C 时,试验件前半部分结焦后的换热系数依然比结焦前低,然而在距入口 35~45 cm 处结焦后换热系数较结焦前有显著提升。

由于结焦附着在壁面上,主要对靠近壁面处流体的换热产生影响,取内壁面温度 T_w 与主流温度 T_b 的平均值为近壁处流体温度 T_{fw} 。流体出口温度分别为 200 和 400 °C 时,结焦后不同位置处近壁流体温度的分布如图 9 所示。当流体出口温度为 200 °C 时,近壁流体温度比 3 MPa 压力下拟临界温度显著偏低,未达到超临界“拟沸腾”所需温度,近壁处流体密度与主流区流体密度相差不大,且近壁流体的扩散效应与多孔表面对主流区流体的抽吸作用不大。同时,结焦层导热系数很小,约为 $0.038\sim0.19\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ [4],对换热有很强的热阻效应,因此结焦后换热系数相对于结焦前明显偏低。当流体出口温度上升至 400 °C 时,距入口 35~45 cm 处近壁流体温度接近并跨越拟临界温度,此时流体发生“拟沸腾”换热。由 RP-3 物性[19] 可知,在拟临界温度附近,流体密度随温度的升高急剧减小,在较大密度差的作用下,结焦形成的多孔层使“拟沸腾”换热得到强化,换热系数较结焦前明显增大。

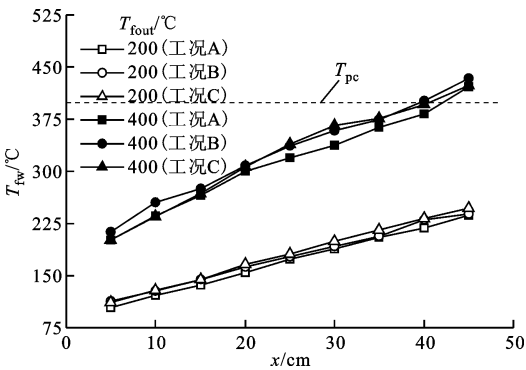


图 9 结焦后近壁流体温度沿轴向的变化

3 结 论

本文实验研究了 3 MPa 压力下,航空煤油 RP-3 在 $\Phi 3\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 高温合金钢管内热裂解结焦过程中的流动换热特性,探讨了结焦前后管内对流换热特性的差异,主要结论如下。

- (1) 航空煤油 RP-3 的热裂解结焦过程是一个不稳定的动态过程,伴随着结焦产物的随机沉积与脱落,同时壁面温度越高结焦速率越快。
- (2) 结焦在管道内壁面形成多孔结构层,当近壁流体温度接近或高于拟临界温度时,多孔层对超临界“拟沸腾”换热有强化作用。
- (3) 当近壁流体温度不足以维持“拟沸腾”换热时,结焦层的热阻效应使对流换热发生恶化。

参考文献:

- [1] HUANG H, SPADACCINI L J, SOBEL D R. Fuel-cooled thermal management for advanced aero engines [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 2004, 126(2): 284-293.
- [2] EDWARDS T. Cracking and deposition behavior of supercritical hydrocarbon aviation fuels [J]. *Combustion Science & Technology*, 2007, 178(1): 307-334.
- [3] 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.
- [4] 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. Effect of RP-3 coke deposition on heat transfer under supercritical pressure [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(4): 832-837.
- [5] 王夕, 刘波, 祝银海, 等. 超临界压力下 RP-3 在细圆管内对流换热实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(2): 360-365.
WANG Xi, LIU Bo, ZHU Yin Hai, et al. Experimental investigation on convection heat transfer of supercritical pressure RP-3 in a small pipe [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(2): 360-365.
- [6] QIN Jiang, JIANG Yuguang, FENG Yu, et al. Flow rate distribution of cracked hydrocarbon fuel in parallel pipes [J]. *Fuel*, 2015, 161: 105-112.
- [7] 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.
- [8] 金迪, 徐国强, 王英杰, 等. 不锈钢表面氧化对 RP-3 航空煤油热氧化结焦的影响 [J]. *航空发动机*, 2010, 36(1): 34-37.
JIN Di, XU Guoqiang, WANG Yingjie, et al. Influence of stainless steel oxidizing on the thermal oxidation coking of RP-3 aviation kerosene [J]. *Aero-engine*, 2010, 36(1): 34-37.
- [9] 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 Xie, 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.
- [10] EDWARDS T. Aviation fuel development: past highlights and future prospects [C]// *AIAA International Air and Space Symposium and Exposition: The Next 100 Years*. Reston, USA: AIAA, 2003: 2611.
- [11] LIU Zhaohui, BI Qincheng, GUO Yong, et al. Hydraulic and thermal effects of coke deposition during pyrolysis of hydrocarbon fuel in a mini-channel [J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(6): 3672-3679.
- [12] 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.
- [13] DENG Hongwu, ZHU Kun, XU Guoqiang, et al. Isobaric specific heat capacity measurement for kerosene RP-3 in the near-critical and supercritical regions [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2012, 57(2): 263-268.
- [14] 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.
- [15] GASCOIN N, ABRAHAM G, GILLARD P. Thermal and hydraulic effects of coke deposit in hydrocarbon pyrolysis process [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2012, 26(1): 57-65.
- [16] XU Pengfei, LI Qiang, XUAN Yimin. Enhanced boiling heat transfer on composite porous surface [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 80: 107-114.
- [17] 付鑫, 任小军, 张鹏, 等. 多孔表面的液氮池沸腾实验研究 [J]. *低温与超导*, 2014, 42(8): 21-25.
FU Xin, REN Xiaojun, ZHANG Peng, et al. Experimental research on pool boiling of liquid nitrogen on porous surfaces [J]. *Cryogenics*, 2014, 42(8): 21-25.
- [18] CIESLINSKI J T, KRASOWSKI K. Heat transfer during pool boiling of water, methanol, and r141b on porous coated horizontal tube bundles [J]. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2013, 20(2): 165-177.
- [19] DENG Hongwu, ZHANG Chunben, XU Guoqiang, et al. Density measurements of endothermic hydrocarbon fuel at sub- and supercritical conditions [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2011, 56(6): 2980-2986.

(编辑 荆树蓉)