

# 扭带管内吸热型碳氢燃料结焦及 流动换热特性实验研究

程想, 冯松, 陈强, 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:** 为了探究新型飞行器热防护结构与换热部件中结焦及流动换热机理, 选择内置扭带的外径6 mm、壁厚1 mm的304型合金圆管, 在质量流量为1.2 g/s、流体出口压力为3 MPa、出口温度为620 °C的实验条件下, 探究了内置扭带(扭曲比  $y=6.31, 12.63$ )对吸热型碳氢燃料结焦及流动换热特性的影响。实验结果表明: 相较于普通圆管, 插入扭带后, 结焦堵塞引起了实验段压降最大值降低了85%以上, 管内结焦量减少了93%以上, 实验管段外壁温随时间变化的幅度减小, 相同位置的  $Nu$  有明显的提高。分析得知: 螺旋扭带能使管内碳氢燃料产生旋转并引起二次流, 在强化传热的同时可以冲刷附着在管内壁上的结焦沉淀, 减少结焦量, 进一步强化换热。

**关键词:** 扭带管; 吸热型碳氢燃料; 结焦; 换热

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtub202006017 **文章编号:** 0253-987X(2020)06-0133-07



OSID 码

## Experimental Investigation on the Flow and Heat Transfer Characteristics of Endothermic Hydrocarbon Fuel During Coking in Circular Tubes with Twisted-Tape Inserts

CHENG Xiang, FENG Song, CHEN Qiang, BI Qincheng

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

**Abstract:** The mechanism of flow and heat transfer during coking in the thermal protection structure and heat transfer parts of new aircraft is explored. A  $\Phi 6\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  304 alloy steel tube with twisted-tape inserts is selected to perform experiments (twist ratio  $y=6.31, 12.63$ ). Experiments are conducted at the mass flow rate of 1.2 g/s, the outlet pressure of 3 MPa, and the outlet temperature of 620 °C. Results and a comparison with ordinary tubes show that the maximum value of the pressure drop in the experimental section due to coking blockage reduces by more than 85%, the amount of coke in the tube reduces by more than 93%, the variation amplitude of the outer wall temperature of the experimental tube is reduced, and  $Nu$  in the same position is significantly enhanced. These results reveal that the spiral bond can rotate the fluid in the tube and cause secondary flow. While enhancing the heat transfer, it can wash the coke deposits attached to the inner wall of the tube, reduce the amount of coking and further enhance heat transfer.

**Keywords:** spiral band; endothermic hydrocarbon fuel; coking; heat transfer

近年来,再生主动冷却技术(RC)与先进空冷系统(ACACS)得到了广泛关注,显示出巨大的潜在应用价值。无论是再生主动冷却还是先进空冷,都是指利用发动机自身携带的燃料流经布有微小通道的发动机受热表面或者冷却气体换热面,以此来冷却发动机受热表面或者冷却气,进而达到热防护与提高换热效率的目的<sup>[1-2]</sup>。然而在冷却过程中,吸热型碳氢燃料往往会被加热到较高的温度。在高温环境下,吸热型碳氢燃料会发生结焦反应<sup>[3]</sup>,结焦沉淀附着在通道内壁上,影响流体的流动和传热,严重时甚至会堵塞管道,影响发动机的安全。为了解决这一问题,研究人员进行了大量研究。朱锟等研究表明,压力、进口温度、材料表面特性影响煤油热氧化结焦<sup>[4]</sup>;潘辉等研究表明,结焦是不稳定的过程,热裂解导致的结焦在近壁处流体不同温度下有可能使传热强化或者恶化<sup>[5]</sup>;Fu等通过实验探究了螺旋管对碳氢燃料氧化结焦的抑制作用,结果显示,相较于光管,螺旋管内结焦量明显降低<sup>[6]</sup>。为了进一步研究结焦抑制与强化传热机理,考虑在圆管内插入螺旋纽带抑制结焦并强化换热。

螺旋纽带作为一种加工简单、使用方便的管内插入物,在强化传热与除垢技术领域得到了广泛关注与研究<sup>[7]</sup>,但是相关研究大多集中在以水为介质的换热过程<sup>[8-9]</sup>,而没有考虑将其使用在以碳氢燃料为工质的换热过程中。同时,已有的关于碳氢燃料结焦及流动换热特性的研究,大多集中在温度较低的氧化结焦过程<sup>[4,6,10]</sup>,而飞行器在高速飞行时,未经冷却的发动机壁面温度将达到 3 000 ℃<sup>[11]</sup>。因此,本文在课题组之前的研究<sup>[5,12-15]</sup>基础上,选择吸热型碳氢燃料作为实验工质,探究纽带管内碳氢燃料结焦及流动换热特性。

## 1 实验系统及实验工况

### 1.1 实验系统

碳氢燃料结焦实验系统如图 1 所示,吸热型碳氢燃料经高压恒流泵加压打入实验系统,流经过滤器与质量流量计后进入实验段,在实验段内进行结焦反应。结焦反应包括热氧化结焦与热裂解结焦两种,其中,热氧化结焦是指碳氢燃料在温度达到 160 ℃以上时,溶解氧会和燃料分子发生化学反应并最终形成焦炭粒子附着在受热表面<sup>[16]</sup>;热裂解结焦是指碳氢燃料在 410 ℃以上时,燃料分子本身发生碳碳键断裂的热裂解反应并最终析出芳香烃附着在通道表面<sup>[17]</sup>。

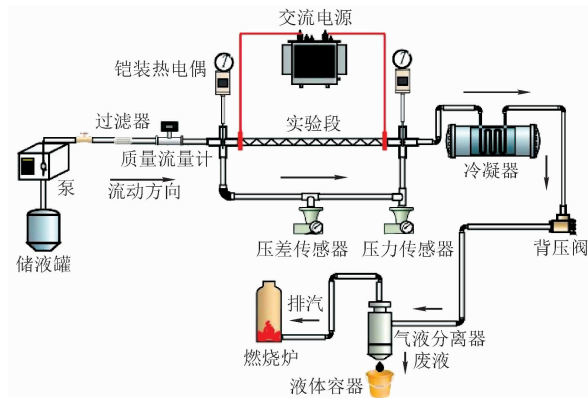


图1 碳氢燃料结焦实验系统示意图

结焦反应后,燃料进入冷凝器,冷凝之后进入气液分离器,分离得到的废汽进入燃烧炉燃烧,废液则收集起来进一步处理。实验过程中,通过电加热方式对实验段碳氢燃料加热。在实验段前后加装 K 型铠装热电偶测量实验段进出口流体温度;在实验段出口处加装压力传感器监测实验段出口压力;在实验段加装压差传感器监测实验段进出口压差。为了测量实验段壁温,在实验管道外壁面上下均匀点焊 9 对热电偶。实验由冷凝器后的背压阀调节实验压力。为了减少额外散热,实验段外包裹保温棉。

### 1.2 内置纽带管

内置纽带管即在光管内插入螺旋纽带。实验段使用外径 6 mm、壁厚 1 mm 的 304 型合金钢管,实验段总长度为 950 mm,有效加热长度为 850 mm,结焦实验段上下等距焊有 9 对热电偶,测温点的间隔为 85 mm。定义进口侧加热电极点处为  $x=0$  的坐标点,则测温点处的位置分别为  $x=85,170,255,340,425,510,595,680,765$  mm。

定义扭曲比  $y=H/W$ ,其中, $H$  为纽带螺距, $W$  为纽带宽度,纽带示意图如图 2 所示。本文使用的 2 种扭曲比分别为 6.31、12.63。纽带制备使用的材料是宽度为 3.8 mm、厚度为 0.2 mm 的 304 型合金钢。由于管道内径为 4 mm,纽带插入后距内壁面 0.1 mm,将纽带两端与管道进行固定,即得到符合实验要求的纽带管。

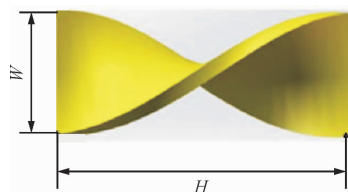


图2 纽带示意图

1.3 实验工况

定义出口温度达到 620℃并稳定下来的时刻为实验的初始时刻( $\tau=0$  s)。在实验过程中,如果实验段压降出现飞升,则马上停止实验。具体的实验工况如表 1 所示。

表 1 实验工况表

| 工况        | 流量 $m$<br>/( $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 出口温度<br>$t/^\circ\text{C}$ | 出口压力<br>$p_0/\text{MPa}$ | 实验时间<br>$\tau/\text{ks}$ |
|-----------|-----------------------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 无扭带       | 1.2                                           | 620                        | 3                        | 3.1                      |
| $y=6.31$  | 1.2                                           | 620                        | 3                        | 3.3                      |
| $y=12.63$ | 1.2                                           | 620                        | 3                        | 3.9                      |

2 数据处理与不确定度分析

2.1 数据处理

实验直接得到的数据为实验管段外壁面温度,通过有内热源的二维稳态导热方程可以求出内壁面温度

$$t_i = t_w + \frac{\phi}{4\lambda}(r_o^2 - r_i^2) + \left(\frac{\phi r_o^2}{2\lambda} - \frac{q_{\text{loss}}}{\lambda}r_o\right)\ln \frac{r_i}{r_o} \tag{1}$$

式中: $t_i$  为内壁温; $t_w$  为外壁温; $r_o$  为外径半径; $r_i$  为内径半径; $\lambda$  为 304 型合金钢的导热系数; $q_{\text{loss}}$  为外壁面散热热流,通过干烧法<sup>[18]</sup>确定,测定值为 10.96 kW/m; $\phi$  为单位内热源,表达式为

$$\phi = \frac{UI}{\pi(r_o^2 - r_i^2)L} \tag{2}$$

其中  $U$  为加热电压, $I$  为加热电流, $L$  为有效加热长度。

总加热热流

$$q = \frac{UI}{2\pi r_i L} \tag{3}$$

各测温点处的对流换热系数表达式为

$$h = \frac{q_{\text{eff}}}{t_i - t_b} \tag{4}$$

式中: $q_{\text{eff}}$  为减去散热损失的有效热流; $t_b$  为流体中心温度,可由燃料热沉和吸热量差值得求。

2.2 不确定度分析

实验所使用的 K 型热电偶在温度范围为 0~500℃时测量误差为±0.5℃,在温度范围为 500~800℃时测量误差为±1.0℃;实验使用的质量流量计型号为 SITRANS F C MASS 2100 DI 1.5,流量测量不确定度为 0.1%;出口处压力以及实验段压差均采用 Rosemount 3051 变送器测量,压力及压差测量不确定度分别为 0.23%和 1.36%。

热流密度相对合成标准不确定度

$$u_{\text{crel}}(q) = \frac{1}{q} \left[ \left( \frac{\partial q}{\partial U} \right)^2 u^2(U) + \left( \frac{\partial q}{\partial I} \right)^2 u^2(I) + \left( \frac{\partial q}{\partial r_i} \right)^2 u^2(r_i) + \left( \frac{\partial q}{\partial L} \right)^2 u^2(L) \right]^{1/2} \tag{5}$$

式中: $u(U)$  为加热电压的标准不确定度; $u(I)$  为加热电流的标准不确定度; $u(r_i)$  为内径半径的标准不确定度; $u(L)$  为有效加热长度的标准不确定度。

经计算,热流密度相对合成标准不确定度为 6.46%。对流换热系数相对合成标准不确定度  $u_{\text{crel}}(h)$  的计算公式为

$$u_{\text{crel}}(h) = \frac{1}{h} \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial q_{\text{eff}}} \right)^2 u^2(q_{\text{eff}}) + \left( \frac{\partial h}{\partial t_i} \right)^2 u^2(t_i) + \left( \frac{\partial h}{\partial t_b} \right)^2 u^2(t_b) \right]^{1/2} \tag{6}$$

式中: $u(q_{\text{eff}})$  为有效热流的标准不确定度; $u(t_i)$  为内壁温的标准不确定度; $u(t_b)$  为流体中心温度的标准不确定度。

经计算,对流换热系数相对合成标准不确定度为 6.49%。

3 结果与分析

3.1 结焦流动特性分析

文献[5]和[13]表明,实验段压降与管道等效直径的 4 次方成反比,因此,结焦附着所导致的管道内径的减小可以通过实验段的压降反映出来。实验得到的不同工况下进出口压降  $\Delta p$  随时间  $\tau$  变化的趋势如图 3 所示。

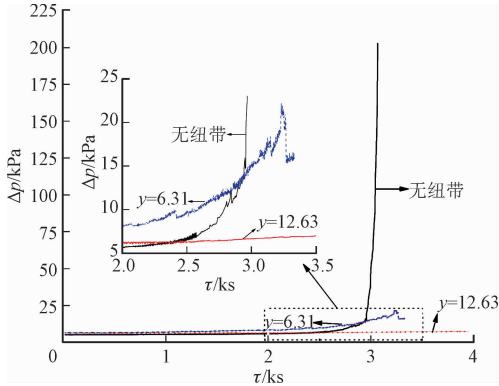


图 3 实验段压降随时间变化趋势

由图 3 可知,在实验开始阶段,扭带管内压降稍高于无扭带的工况,这是因为扭带的插入使得管内有效流通横截面减小,进而导致压降升高,但是由于扭带较薄,截面面积减小值仅为 6%,因此,扭带的插入而引起的压降的升高对实验工况的影响可以忽略不计。

在无纽带工况下,实验段压降在 3.0 ks 左右开始飞速上升并很快超过 200 kPa,表明在无纽带实验管段内结焦附着严重,严重堵塞了管道,造成压降的飞升。插入纽带之后,实验段压降变化变得平缓,压降最大值比无纽带工况下降了 85% 以上,这是因为螺旋纽带使管内碳氢燃料产生旋转并引起二次流,抑制了结焦反应,且旋涡运动使得流体不断冲刷管壁产生强烈扰动和径向混合,有效减少了圆管内壁的附着焦沉淀。

在扭曲比  $y=6.31$  的工况下,实验段压降在 1.7 ks 时开始缓慢上升,在 3.2 ks 时达到最大值 22.2 kPa,继而压降有一个突降,原因可能是结焦脱落。由于结焦是一个不稳定的过程,伴随着结焦的随机附着与脱落,压降会上升或者下降。

在扭曲比  $y=12.63$  的工况下,压降的变化最为平缓,从开始至实验结束,压降的上升值仅为 1.4 kPa,也就是说,扭曲比  $y=12.63$  的纽带比  $y=6.31$  的纽带能更好地抑制结焦的附着。由于碳氢燃料在管道内的停留时间会影响结焦的产生,停留时间越长,越容易结焦并附着在管道内壁上,而纽带的结构决定了扭曲比越小,燃料在管道内停留时间越长,故扭曲比  $y=6.31$  的工况时的结焦量稍多于扭曲比  $y=12.63$  的工况。

实验结束后,将实验管段用线切割等距切为 10 小段。使用称质法<sup>[19]</sup>测量实验管段结焦量,得到不同工况的总结焦量,如图 4 所示。

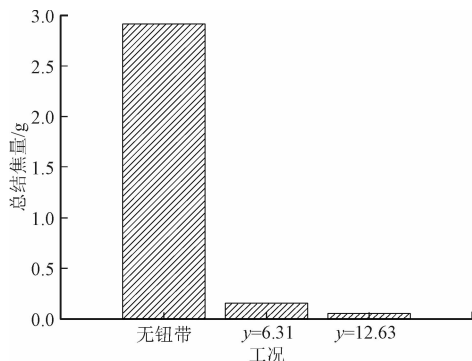


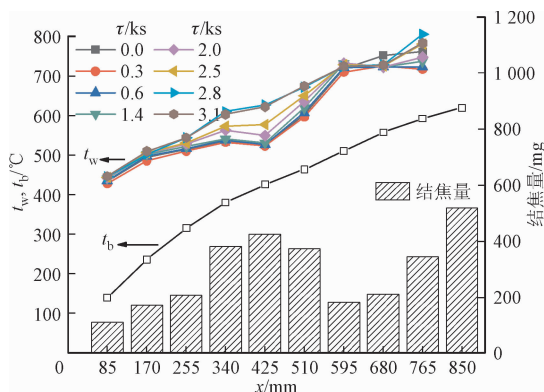
图 4 不同工况的总结焦量

图 4 与图 3 所反映的结焦量情况一致,实验管段内插入纽带之后,结焦量明显降低;在  $y=6.31$  时,结焦量比无纽带工况降低了 93% 以上;在  $y=12.63$  时,结焦量比无纽带工况降低了 98% 以上,而且  $y=6.31$  工况的结焦量略多于  $y=12.63$  的工况。

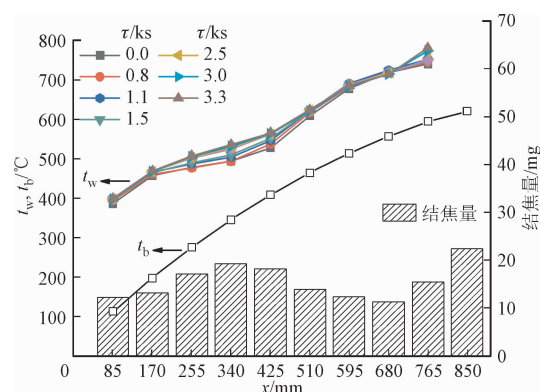
### 3.2 结焦换热特性分析

文献[20-21]中报道,结焦沉淀所形成的结焦层

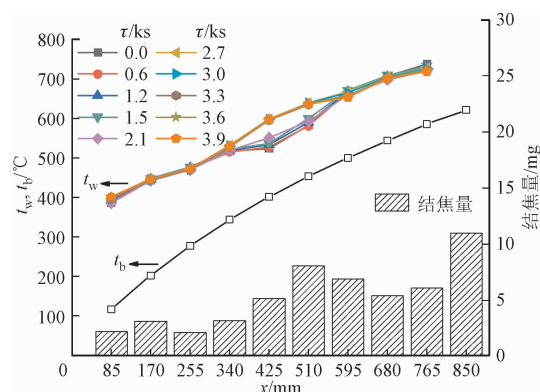
的导热系数较小,使得内壁面与流体换热的热阻增大,体现在壁温上,即壁温升高,传热恶化。为了探究纽带管内吸热型碳氢燃料结焦换热性能,将实验测得的壁温数据与结焦量数据进行对比,得到图 5。



(a) 无纽带



(b)  $y=6.31$



(c)  $y=12.63$

图 5 不同工况下壁温与各段结焦量

无纽带工况下(图 5a),壁温变化幅度最大,检测到壁温变化的最大值出现在  $x=425$  mm 测温点处,壁温升高的最大值为 104.4 °C,对应于各段结焦量,该测温点附近出现了第一个结焦量峰值。分析原因得知,在该测温点附近,结焦附着较为严重,导



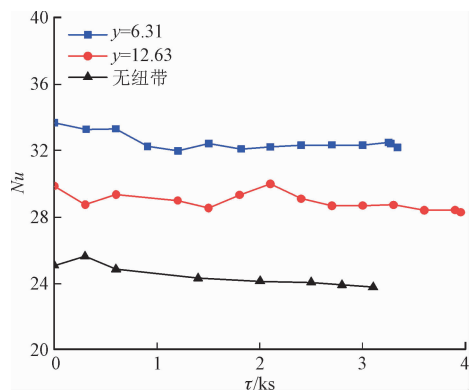
致明显的传热恶化。由于该测温点处燃料温度在  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,根据 Chin 等<sup>[22]</sup>的研究理论,此时,热氧化结焦与热裂解结焦共存,且沉积率达到一个较大值,因此,此处的结焦附着严重,对传热的影响较大。而沿着流动方向,在第一个结焦量峰值之后,随着管内流体温度逐渐升高,热氧化结焦反应急剧减弱,热裂解结焦反应加剧,故而在管内流体温度最高的出口处出现第二个结焦量峰值。观察发现,在  $x=680\text{ mm}$  处,壁温下降;在  $x=765\text{ mm}$  处,壁温甚至出现了先下降再上升的变化趋势。分析原因得知,由于结焦的附着,在管道内壁形成了多孔结构,流经结焦多孔结构层的流体受到壁面的加热,与中心区域流体形成明显的密度差,热流体扩散,同时,多孔结焦结构表面形成的抽吸力使中心区域流体不断进入多孔结构,增强了流体的扰动使换热加强;而随着结焦沉淀的增加,多孔结构被破坏,因此壁温出现先下降再上升的情况。

在图 5b 所示扭曲比  $y=6.31$  的工况下,壁温变化幅度最小,壁温变化的最大值出现在  $x=340\text{ mm}$  测温点处,壁温升高的最大值为  $43.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,小于无纽带的工况;对应于各段结焦量,在该测温点处出现了第一个结焦量的峰值,但是每一段的结焦量都远远小于无纽带的工况,即结焦与传热恶化都得到了抑制。分析原因,纽带的插入使得流体在流动过程中受到螺旋纽带的作用发生旋转,流体混合更充分,中心区域流体与近壁处高温流体充分掺混;当管内流速达到一定值时,经由燃料流体传递的动力矩会推动螺旋纽带产生振荡,进一步加强流体的旋流运动,流体质点受到径向与切向的力产生二次流,起到强化传热;螺旋纽带的振荡还将对实验管段内壁形成冲刷,减少结焦的附着。综合螺旋纽带的强化传热与抑制结焦附着的作用,光管内置纽带之后,壁温变化幅度减小。与无纽带工况类似的是,在临近出口测温点处,壁温变化幅度略微加大,分析此处的流体温度升高,而热裂解结焦随流体温度的升高沉积速率增大,导致此处结焦量升高,进而影响传热与壁温。

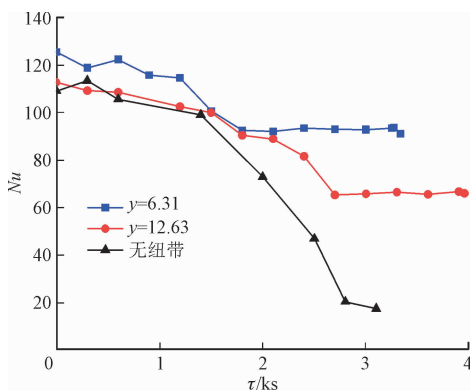
在图 5c 所示扭曲比  $y=12.63$  的工况下,壁温变化幅度小于无纽带工况,但是略高于扭曲比  $y=6.31$  的工况,壁温变化的最大值出现在  $x=425\text{ mm}$  测温点处,壁温升高的最大值为  $75.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在该工况下,结焦量进一步减小,但是壁温变化幅度却略有增大,分析认为随着扭曲比的增大,扭转程度减小,对流体的旋流运动与二次流运动的影响都小于扭曲比  $y=6.31$  的工况,因而强化换热的能力有所降低。

分析图 5 发现,3 种工况下流体中心温度的变化趋势基本一致,且都出现了 2 次结焦量的峰值,分别对应于壁温变化的 2 个较大值。

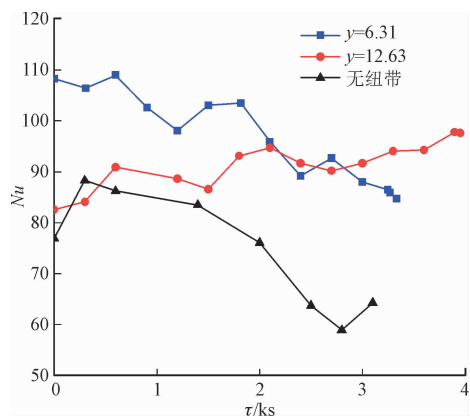
为了更为直观地比较内置纽带对换热能力的影响,选择  $x$  为  $85$ 、 $425$ 、 $765\text{ mm}$  的 3 个测温点,3 种工况下在这 3 个测温点处努塞尔数  $Nu$  随时间变化的趋势如图 6 所示。



(a)  $x=85\text{ mm}$



(b)  $x=425\text{ mm}$



(c)  $x=765\text{ mm}$

图 6 努塞尔数  $Nu$  随时间变化的趋势图

如图 6a 所示,在靠近流体入口( $x=85\text{ mm}$ )处,  $Nu$  变化最为平缓,但是,扭曲比  $y=6.31$  的工况下

$Nu$  始终最大,无纽带工况的  $Nu$  始终最小。这是由于进口侧结焦量较少,对流体的换热性能影响较小,因此曲线变化平缓;由于纽带的强化换热作用,插入纽带之后,对流换热效果增强, $Nu$  变大。

在  $x=425$  mm 附近,3 种工况下都出现了第一个结焦量的峰值(见图 5),该点的  $Nu$  随时间的变化幅度较大,如图 6b 所示,尤其是无纽带的工况,对流换热系数变化值达到了  $1.832 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $Nu$  变化值达到了 96,这是由于该处结焦沉淀过多,导致较为严重的传热恶化。而插入纽带之后,2 种扭曲比工况下在  $1.3 \sim 2.0$  ks 时  $Nu$  比较接近。分析原因,是扭曲比  $y=6.31$  的强化传热性能高于扭曲比  $y=12.63$  的工况;而扭曲比  $y=12.63$  的工况下,抑制结焦沉淀的性能要好于扭曲比  $y=6.31$  的工况,在 2 种因素的共同作用下,对流换热效果在某一时间段接近, $Nu$  相互靠近。

在靠近出口侧( $x=765$  mm),如图 6c 所示,整体而言,扭曲比  $y=6.31$  的工况  $Nu$  呈下降趋势,对流换热效果减弱;而扭曲比  $y=12.63$  的工况,  $Nu$  呈上升趋势,对流换热效果增强。分析其原因,有可能是扭曲比  $y=12.63$  的工况时,在出口处管壁上附着了较薄的一层焦粒,在减小流动面积的同时破坏了流动边界层,使得换热效果有所增强,  $Nu$  提高;而对于扭曲比  $y=6.31$  的工况,出口处结焦量多于扭曲比  $y=12.63$  的工况,结焦附着严重,无法形成多孔结构层,由于结焦层本身的导热系数较小,使得传热恶化,  $Nu$  减小。

因为结焦是一个随机的、复杂的动态过程<sup>[12]</sup>,所以  $Nu$  随时间的变化也呈现出不规则性。但是,分析图 6 可以发现,内置纽带之后,  $Nu$  有了明显的提高,对流换热效果增强,且扭曲比  $y=6.31$  的工况下对流换热效果提升更明显。

## 4 结 论

本文通过实验研究了吸热型碳氢燃料在压力 3 MPa、出口温度  $620^\circ\text{C}$ 、输入质量流量  $1.2 \text{ g/s}$  的工况下,在光管中,扭曲比  $y$  分别为 6.31、12.63 的内置纽带管中结焦及流动换热性能,得到的主要结论如下。

(1)碳氢燃料的结焦过程是一个不稳定的动态过程,伴随着结焦的产生与脱落,对流体的流动与换热性能产生影响。

(2)在吸热型碳氢燃料结焦及流动换热过程中,圆管内插入螺旋纽带之后,由于结焦堵塞引起实验

段压降最大值降低了 85%以上,管内结焦量减少了 93%以上,大幅减少了结焦的附着并提高了其换热性能。

(3)扭曲比  $y=12.63$  的纽带对结焦的抑制作用强于扭曲比  $y=6.31$  的纽带,但是其综合强化换热性能较弱。

## 参考文献:

- [1] GASCOIN N, GILLARD P, BERNARD S, et al. Measurements for fuel reforming for scramjet thermal management and combustion optimization: status of the COMPAREER project [C]//14th AIAA/AHI Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2006: 8005.
- [2] PIZZARELLI M, NASUTI F, ONOFRI M. Coupled wall heat conduction and coolant flow analysis for liquid rocket engines [J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 29(1): 34-41.
- [3] EDWARDS T. Cracking and deposition behavior of supercritical hydrocarbon aviation fuels [J]. Combustion Science & Technology, 2007, 178(1): 307-334.
- [4] 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.
- [5] 潘辉, 冯松, 刘朝晖, 等. 航空煤油 RP-3 热裂解结焦及流动换热特性实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(7): 7-12.  
PAN Hui, FENG Song, LIU Zhaohui, et al. Experimental investigation on the flow and heat transfer characteristics of aviation kerosene RP-3 during thermal pyrolysis coking [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(7): 7-12.
- [6] 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.
- [7] 林宗虎, 汪军, 李瑞阳, 等. 强化传热技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 52-53.
- [8] 张昌建, 苗艾印. 内置螺旋纽带换热器强化传热性能实验分析 [J]. 节能, 2019, 38(1): 59-62.  
ZHANG Changjian, MIAO Aiyin. Experimental anal-

- ysis of enhanced heat transfer performance of heat exchanger with twisted tape insert [J]. *Energy Conservation*, 2019, 38(1): 59-62.
- [9] MAN Changzhong, WANG Chong, YAO Jinyou. The current situation of the study on twisted tape inserts in pipe exchangers [J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2014(13): 477-483.
- [10] 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.
- [11] EDWARDS T. Aviation fuel development: past highlights and future prospects [C]// *AIAA International Air and Space Symposium and Exposition: The Next 100 Years*. Reston, VA, USA: AIAA, 2003: 2611.
- [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] 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.
- [14] 张赞坚, 刘朝晖, 潘辉, 等. 低流阻火箭煤油的超临界压力流动与换热特性 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(1): 129-134.
- ZHANG Zanjian, LIU Zhaohui, PAN Hui, et al. Flow and heat transfer characteristics of low-flow resistance rocket kerosene under supercritical pressure [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(1): 129-134.
- [15] FENG Song, BI Qincheng, PAN Hui, et al. Isobaric specific heat capacities of emulsified kerosene at high temperature and pressure [J]. *Thermochimica Acta*, 2018, 665, 127-133.
- [16] EDWARD T, ZABAMICK S. Supercritical fuel deposition mechanisms [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1993, 32(12): 3117-3122.
- [17] GUEL O, 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: 433-439.
- [18] HOU Lingyun, ZHANG Dingrui, ZHANG Xiaoxiong. Interaction between thermal cracking and steam reforming reactions of aviation kerosene [J]. *Fuel Processing Technology*, 2017, 167: 655-662.
- [19] 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.
- [20] TAO Zhi, FU Yanchen, XU Guoqiang, et al. Thermal and element analyses for supercritical RP-3 surface deposition under stable and vibration conditions [J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(3): 2006-2013.
- [21] 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.
- [22] CHIN J S, LEFEBVRE A H. Experimental techniques for the assessment of fuel thermal stability [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1992, 8(6): 1152-1156.

#### [本刊相关文献链接]

潘辉, 冯松, 刘朝晖, 等. 航空煤油 RP-3 热裂解结焦流动换热特性实验研究. 2016, 50(7): 7-12. [doi:10.7652/xjtuxb201607002]

李健武, 符阳春, 张志伟, 等. 进口雷诺数和湿空气含湿量对冲击冷却流动和传热特性的影响. 2020, 54(5): 170-178. [doi:10.7652/xjtuxb202005022]

王瑞琴, 晏鑫, 何坤. 带肋板尾缘开缝叶片内的流动传热性能研究. 2020, 54(1): 150-161, 183. [doi:10.7652/xjtuxb202001019]

高中华, 兰海平, 潘辉, 等. 小通道内高参数火箭煤油流动传热特性研究. 2020, 54(1): 108-115. [doi:10.7652/xjtuxb202001014]

王会, 郭烈锦, 刁永发. 梯度渗透率金属泡沫管内的流动与传热特性分析. 2019, 53(11): 85-90. [doi:10.7652/xjtuxb201911012]

谢福寿, 雷刚, 徐元元, 等. 自由分子流区气体外掠平板/圆柱体流动与传热预测. 2019, 53(3): 6-12. [doi:10.7652/xjtuxb201903002]

王娇娇, 陈虹, 厉彦忠, 等. 低温管路预冷过程两相流动与换热计算研究. 2019, 53(1): 93-99. [doi:10.7652/xjtuxb201901012]

张赞坚, 刘朝晖, 潘辉, 等. 低流阻火箭煤油的超临界压力流动与换热特性. 2019, 53(1): 129-134. [doi:10.7652/xjtuxb201901017]

(编辑 亢列梅)