

## 碳氢燃料变压力过程中传热研究\*

姜 蕾<sup>1</sup>, 刘朝晖<sup>1</sup>, 毕勤成<sup>1</sup>, 刘忠轩<sup>2</sup>, 颜建国<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 国电科学技术研究院, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 碳氢燃料广泛应用于再生冷却技术中, 为了研究其不同压力下和压力变化过程中的传热规律, 使用内径1mm圆管进行了变压力过程实验。试验参数: 冷态流量1g/s, 流体出口温度500℃, 压力1~4MPa。在不同压力稳态的传热试验中发现了两种类型的传热恶化: 亚临界下的膜态沸腾和超临界时的入口层流化。研究了变压力时的传热特性, 重点分析了不同换热区域的外壁温动态变化, 发现了变压力过程中的壁温非单调特性, 在超临界压力下动态变化时的传热弱于稳态的传热。实验中还研究了三种不同升压速率对换热的影响, 结果显示压力变化速率对传热影响不大。

**关键词:** 碳氢燃料; 压力; 传热; 动态特性

中图分类号: TK124

文献标志码: A

文章编号: 1001-4055 (2014) 07-0965-08

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2014.07.013

## Heat Transfer of Hydrocarbon Fuel During Transient Pressure

JIANG Lei<sup>1</sup>, LIU Zhao-hui<sup>1</sup>, BI Qin-cheng<sup>1</sup>, LIU Zhong-xuan<sup>2</sup>, YAN Jian-guo<sup>1</sup>

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

2. Guodian Science and Technology Research Institute, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** Hydrocarbon fuel is widely used in the regenerative cooling technology. To investigate heat transfer characteristics of the fuel at different pressure and during transient pressure, a mini circular tube with 1mm inner diameter was employed to conduct pressure changing experiments. Mass flow rate was 1g/s, outlet fluid temperature was 500℃, and pressure was changed from 1 to 4MPa. Firstly, heat transfer under different steady states was studied. Results show that two kinds of heat transfer deterioration appear: film boiling happens at sub-critical pressure and inlet flow laminarization occurs at supercritical pressure. Then the dynamic changes of outside wall temperature in different heat transfer regions during transient pressure was analyzed. Results indicate that wall temperature does not change monotonically and heat transfer is worse than that under steady states at supercritical pressure. Pressure transients at three different rates were also carried out, there are neglectable effects on the variations of outside wall temperature.

**Key words:** Hydrocarbon fuel; Pressure; Heat transfer; Dynamic characteristics

### 1 引言

碳氢燃料广泛应用于高超声速飞行器的主动再生冷却系统中。进行冷却时,碳氢燃料在小通道内

流动,通常工作在高热流密度和低质量流量下,在流动过程中会经历多次的传热强化和传热恶化,在高温时还会发生化学反应。国内众多学者对燃料的传热过程进行了实验研究,包括在亚临界流体温度较

\* 收稿日期: 2013-07-29; 修订日期: 2013-10-08。

基金项目: 中国博士后基金 (2013M532044); 青年科学基金 (21306147); 中央高校基本科研业务费专项基金。

作者简介: 姜 蕾 (1989—), 男, 博士生, 研究领域为热能工程多相流。E-mail: jiangleincepu@163.com

低时与传统流动的对比<sup>[1]</sup>,发生传热恶化时的临界热流研究<sup>[2]</sup>,管内有结焦时对传热的影响<sup>[3-5]</sup>以及超临界压力下高温时的换热分析<sup>[6-10]</sup>。也有作者利用单组份或多组分模型对燃料传热进行了简单的模拟研究<sup>[11-13]</sup>。在动态特性研究方面,现有手段主要是仿真研究,采用试验手段进行的研究则较少,主要工质也集中在水、氟利昂等简单物质。现阶段,在公开文献中针对多组分、多相流动的吸热型碳氢燃料的动态特性试验研究的相关报告尚未出现。

胡志宏等<sup>[14]</sup>对高热流条件下超临界压力煤油换热进行实验研究发现传热强化和传热恶化现象,传热强化的机理是拟沸腾,在内壁温达到拟临界温度时发生;传热恶化的机理是类膜态沸腾,临界热流与质量流率、工质进口温度和压力有关。李中洲等<sup>[15]</sup>发现煤油在超临界压力下传热情况从低温到高温依次历经四个过程:(1)正常传热,实验段内壁温和流体温度都低于临界温度;(2)传热强化,内壁温度达到拟临界温度,发生拟沸腾;(3)传热恶化,流体温度处于临界温度附近比热和导热系数都迅速达到极大值之后的缓慢减小区段;(4)第二次传热强化,有机物在高温发生了化学反应。

Liu等<sup>[16]</sup>研究了煤油在小通道内的过冷沸腾换热。过冷沸腾时壁温沿着流动方向保持不变,沸腾壁温与流体温度和质量流量无关,但受压力影响很大,压力增加会使壁温升高,增大热流也会缓慢增加过冷沸腾时的壁温。过冷沸腾主要受压力和热流密度的影响,相同流体温度下压力升高会增大流体过冷度,抑制过冷沸腾。高热流和低压力有利于流体进入过冷沸腾。

Kang等<sup>[17]</sup>以氟利昂,HFC-134a为工质研究了超临界压力下压力变化对传热的动态影响。作者先研究了稳态下的传热情况,提出了传热关联式。在动态特性研究中,作者研究了压力变化速率以及升压力和降压力对传热的影响。结果显示变化速率对传热几乎没有影响,而稳态传热关联式通常将 $Nu$ 数高估了10%~40%。

碳氢燃料是一种成分非常复杂的有机混合物,其传热特性至今还在不断的研究中。先前的研究都集中在稳态方面,本文率先开展了碳氢燃料相关的动态试验研究,讨论其在压力变化过程中的传热特性,并对其中出现的传热恶化影响因素进行讨论。

## 2 试验系统介绍

### 2.1 试验装置

本实验系统是一个开环系统,如图1所示。实验开始时,由恒流泵向实验段输送流体,中间通过质量流量计测定质量流量。实验加热段两端接有压差变送器和铠装热电偶,用以测量加热段压差和流体进出口温度。流体在经过加热段后进入高温过滤器,而后进入套管式换热器、背压阀,最后进入气液分离器。在试验段的下方均匀焊有12个0.2mm镍铬—镍硅热电偶来测量试验段的外壁温度。试验段如图2所示, $\Phi 2 \times 0.5\text{mm}$ 圆管、总长650mm、加热段长度580mm,两端热电偶距离极板15mm,中间热电偶间距50mm。本次实验需要研究动态传热过程,考虑到保温材料的蓄热会对动态过程产生影响,本次实验段未包有保温材料,且由于实验段尺寸较小,动态分析中也未考虑高温合金钢的蓄热。

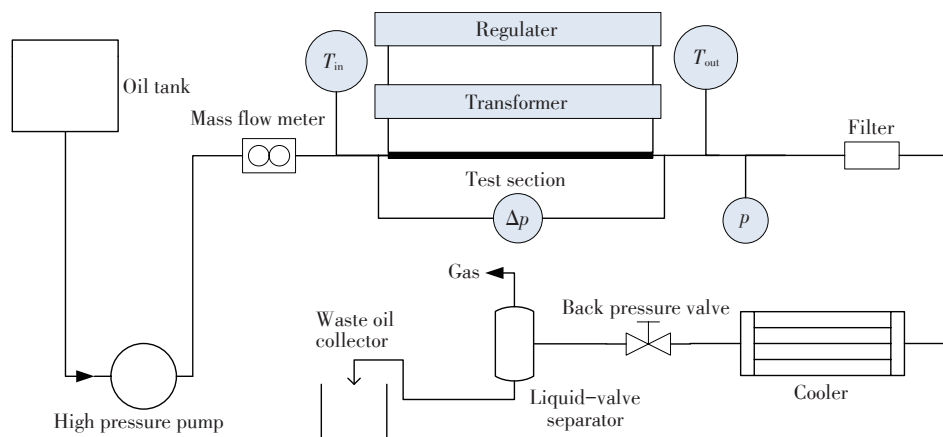


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

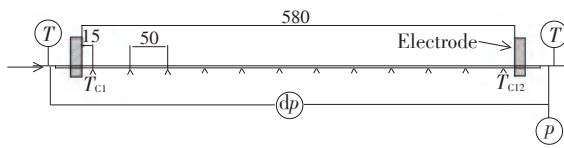


Fig. 2 Schematic of test section(mm)

实验中流体温度测量采用Φ1.5mm K型铠装热电偶,热响应时间小于0.4s,最高测温可到800℃。外壁温采用镍铬—镍硅热电偶。冷态流量测量采用西门子质量流量计,量程18g/s。压力和压差的测量使用Rosemount 3051压力、压差变送器,动态响应时间100ms。数据的采集使用IMP数据采集板。

本试验台所用的测量仪表性能稳定,响应快,精度高,足以满足本次动态特性的数采需求。

实验前利用临界乳光法对本次实验的航空煤油测定临界参数,其临界温度402.7℃,临界压力2.14MPa。

2.2 数据的处理

2.2.1 热效率的确定

本实验采用低电压大电流加热等直圆管,可认为是全周均匀加热。热效率的计算采用干烧法<sup>[15]</sup>,为使结果更加精确,在原文献的基础上通过进行不同管长的实验,将管壁散热与极板散热分开拟合。

处理实验结果时,由于在通流体后管壁温度分布很不均匀,使用温度测点的温度代表其附近一小段距离的管壁平均温度进行散热计算。

实验段的散热

$$Q = 47.5014 - 0.254T_w + 0.001T_w^2 \quad (1)$$

极板的散热

$$T_w < 450^\circ\text{C}, Q = 9.1253 \quad (2)$$

$$T_w > 450^\circ\text{C} \quad Q = 33.116 - 0.1268T_w + 0.0001652T_w^2 \quad (3)$$

式中 $T_w$ 为外壁温, $Q$ 为热损失,单位W。此热效率的标定是在稳态下完成的,动态实验中变化速率较小,可以认为是准静态过程,该热效率也可以应用。

2.2.2 换热系数的计算

实验前在1g/s流量下进行了1~4MPa的热沉测量, $Q_m = UI\eta/m$ , $U$ 为电压, $I$ 为电流, $\eta$ 为热效率, $m$ 为质量流量,图3中显示压力对燃料热沉影响不大,文献[7]中也有类似研究结果。将流体温度拟合成关于热沉的二次多项式

$$T_b = 44.5788 + 0.3598Q_m - 0.000047132Q_m^2 \quad (4)$$

式中 $Q_m$ 为热沉, $T_b$ 为实验中流体出口温度。

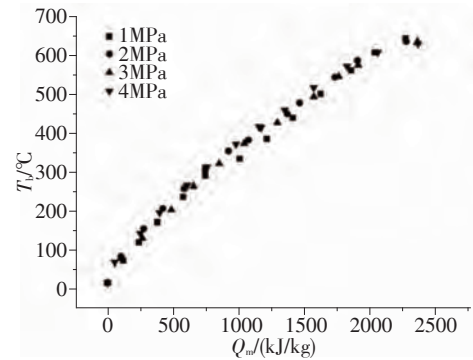


Fig. 3 Heat sink at different pressure

忽略圆管的轴向导热,此时实验段可简化为有内热源的一维稳态导热,控制方程为

$$\frac{d^2t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} + \frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dt} \left( \frac{dt}{dr} \right)^2 + \frac{\phi}{\lambda} = 0 \quad (5)$$

圆管外壁处采用绝热边界条件

$$r = r_o, \quad t = t_w, \quad dt/dr = 0$$

式中内热源  $\phi = UI\eta/(\pi(r_o^2 - r_i^2)l)$ ,  $r_o$  为外半径,  $r_i$  为内半径, $l$ 为管长。本次实验段虽未包有保温材料,但在实验过程中热效率较高,达到94%,采用此边界条件不会对结果引入过大误差。

圆管导热系数 $\lambda$ 随温度线性变化

$$\lambda = 9.6598 + 0.01469T$$

使用四阶Runge-Kutta对方程(5)进行数值求解即可得到内壁温度。

假设圆管被均匀加热,计算出不同测温点处的加热功率后结合热效率和流量就可以得出流体在该点的热沉,由热沉和流体的关系式(4)就可以计算出该点的流体温度。

换热系数可由下式求得

$$h = q/(T_{w,i} - T_b) \quad (6)$$

式中热流密度  $q = UI\eta/(\pi d_i l)$ ,  $T_{w,i}$  为内壁温。

实验中各测量量的误差如表1所示。

Table 1 Uncertainties of experimental measurement

| Parameters                        | Uncertainty |
|-----------------------------------|-------------|
| Fluid temperature, $T_i$ /%       | 0.4         |
| Wall temperature, $T_w$ /%        | 0.5         |
| Pressure, $p$ /%                  | 0.075       |
| Mass flux, $m$ /%                 | 0.05        |
| Heat flux, $q$ /%                 | 2.18        |
| Heat transfer coefficient, $h$ /% | 4.04        |

### 3 试验结果讨论

#### 3.1 稳态换热讨论

实验条件:质量流量  $1.0\text{g/s}$ ,压力在  $1\sim 4\text{MPa}$  变化,维持出口流体温度为  $500^\circ\text{C}$ ,由于压力对流体热沉影响不大,试验中功率仅进行微调。实验过程中功率波动小于  $5\%$ ,流量波动小于  $2\%$ 。根据其换热规律,分别对亚临界状态和超临界状态下实验结果进行讨论。

图4为流体温度其沿管长方向的分布,其中TC表示热电偶测点位置,由于热沉与压力关系不大,在只改变压力的情况下11个热电偶所对应位置的流体温度变化不大。图5、6为不同压力下稳态时的壁温和换热系数分布情况,由于最后一个热电偶测点靠近出口极板,极板在高温时散热较大,对传热结果会有影响,故最后一个测点的数据未给出。可以看出试验段在超临界和亚临界压力较低时壁温分布有很大区别。

##### 3.1.1 亚临界时换热

亚临界时入口段的换热得到强化,且壁温分布独立于流体温度分布,与文献[16]中结果一致,随着流体温度升高,该段的换热系数增大,这是由于燃料在亚临界时发生了过冷沸腾。压力对过冷沸腾有很大影响,随着压力升高,流体过冷度增加,过冷沸腾受到抑制,沸腾壁温升高。

图5中流体温度达到  $150^\circ\text{C}$  时的壁温相对较低,这是由于流体温度超过  $100^\circ\text{C}$  后粘度下降,密度下降,使得  $Re$  增大,流动从层流向湍流变化使得换热增强。过冷沸腾时传热系数沿着流动方向换热系数逐渐增大,这是因为煤油是一种混合物,并没有固定的沸点,沿着流动方向低沸点物质先发生沸腾,主流温度沿流动方向是增加的,而壁温基本无变化。

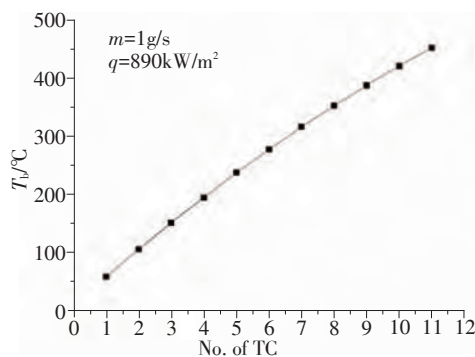


Fig. 4 Fluid temperature along the tube

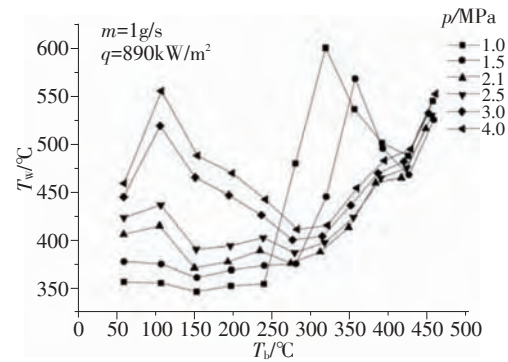


Fig. 5 Outside wall temperature vs. kerosene temperature

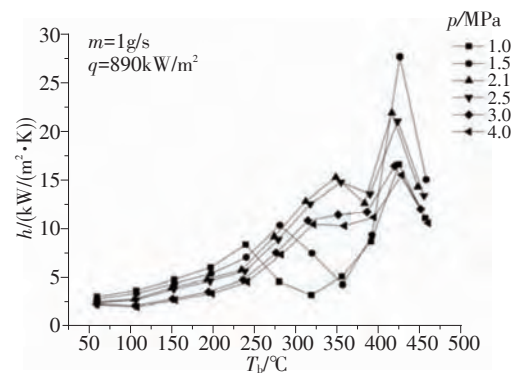


Fig. 6 Heat transfer coefficient vs. kerosene temperature

$1\text{MPa}$  时沸腾换热在油温达到  $240^\circ\text{C}$  处减弱,接下来出现了传热恶化,壁温可上升近  $250^\circ\text{C}$ ,随着压力的升高恶化程度减轻,恶化点后移,在压力达到超临界后传热恶化消失。为了研究该段传热恶化的影响因素,在其它试验条件不变的情况下进行了  $1\text{MPa}$  时不同热流密度和不同流量的实验。图7和图8显示随着热流的升高,传热恶化点前移;随着流量的升高,传热恶化点后移;沸腾壁温都基本维持不变,恶化时的壁温飞升相差不多。根据这些现象推测实验中壁温飞升是因为发生了膜态沸腾,由于壁面温度较高,煤油中一些低沸点组分在主流低于饱和温度时便会发生气化,使壁面覆盖一层气膜,产生传热恶化。

发生膜态沸腾后壁温又出现了显著下降,这是由于油温接近临界点时发生了传热强化。此时的流动已经进入旺盛湍流区,同时流体密度减小,流速增大,会破坏气膜。当流体接近饱和温度时,其比热、导热系数迅速增大,粘度迅速减小,有利于传热,换热系数迅速增大。油温超过  $430^\circ\text{C}$  后流动处于临界温度附近比热和导热系数都迅速达到极大值之后的缓慢减小区段,壁温又有所回升。



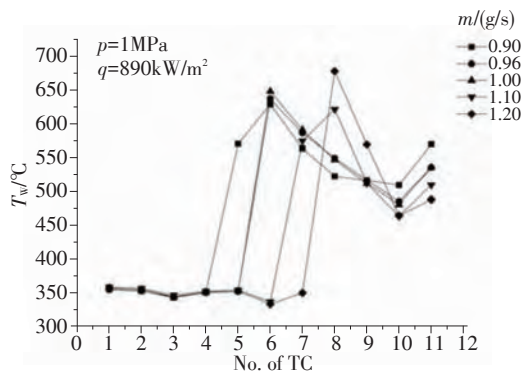


Fig. 7 Outside wall temperature at different mass flow rate and 1MPa

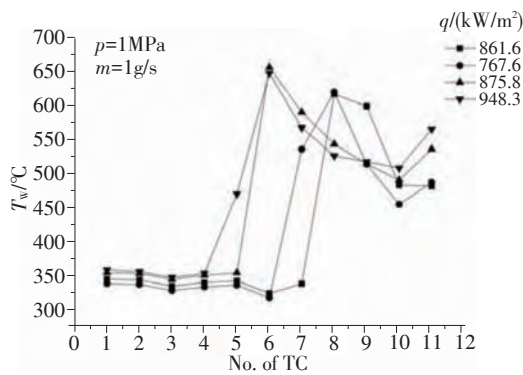


Fig. 8 Outside wall temperature at different heat flux and 1MPa

3MPa不同质量流量对传热恶化的影响实验中发现流体温度从100℃到320℃之间换热系数与质量流量无关,结合文献<sup>[2]</sup>推测除了流态的变化还发生了拟沸腾,使得换热系数明显增加。流体温度达到320℃后拟沸腾减弱,壁温出现缓慢升高,此时内壁温已超过拟临界温度,近壁处流体物性发生剧烈变化,随着温度的升高流体热导率下降形成热阻层,削弱了换热。油温到拟临界温度附近时,流体比热增大,导热系数也增大,出现了传热强化。而最后出现壁温升高是由于流体已远离大比热区,物性变化使得换热效果变差。

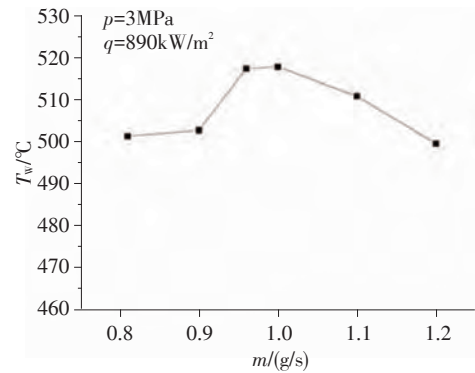


Fig. 9 Outside wall temperature of TC2 at different mass flow rate and 3MPa

### 3.1.2 超临界时换热

超临界换热时会在入口TC2处发生传热恶化,文献[2,18]中也报道了此类现象,此时换热系数有所下降。该处主流温度约为105℃,内壁温则超过400℃,近壁处流体吸热后温度较高,中心流体粘度高而近壁处流体粘度低,这样就使得流动边界层增厚,出现层流化现象,发生了传热恶化,恶化程度随着压力的升高加重。

本次实验还对比了3MPa时不同热流密度和质量流量对传热恶化的影响,结果显示恶化点位置未发生移动。图9显示在流量发生较大变化时其恶化程度几乎无变化,流量对其传热恶化影响不大。图10显示热流密度较低时随着热流密度升高其恶化程度加重,超过736kW/m²时其影响减小,这是由于热流达到一定强度后近壁处流体已得到充分的加热,继续加大热流对其物性变化已无明显影响。

随着主流区流体温度升高,当超过100℃后出现了传热强化,壁温迅速降低。流体温度达到100℃以后由于物性变化会使主流从层流向湍流转变。在

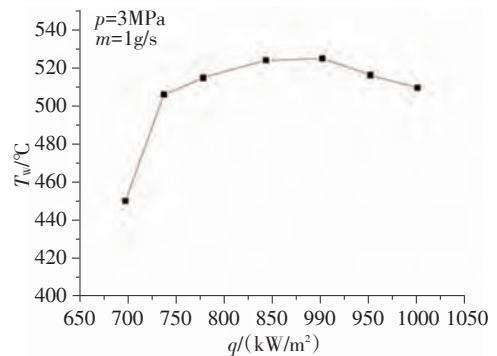


Fig. 10 Outside wall temperature of TC2 at different heat flux and 3MPa

### 3.2 动态换热讨论

对于动态过程目前进行的研究较少,没有较为成熟可靠的经验公式,本文通过外壁温变化对传热进行初步分析。

#### 3.2.1 壁温变化

以17.6 kPa/s的速率进行压力1~4MPa缓慢变动实验,按照传热规律试验段可大致分为3个不同区域:TC1~TC5;TC5~TC9;TC9~TC11,在不同的换

热区域内温度的动态响应是不同的,亚临界时的过冷沸腾区(TC1~TC5)壁温会明显升高;膜态沸腾区(TC6~TC9)壁温明显下降;大比热区附近(TC9~TC11)壁温变化不明显。以下讨论一些传热特殊点在动态变化中壁温随时间的变化规律,选取4个典型的位于不同传热区域的测温点绘制出其动态变化曲线(图11),并将其中三个点的壁温与稳态不同压力下做对比(图12)。

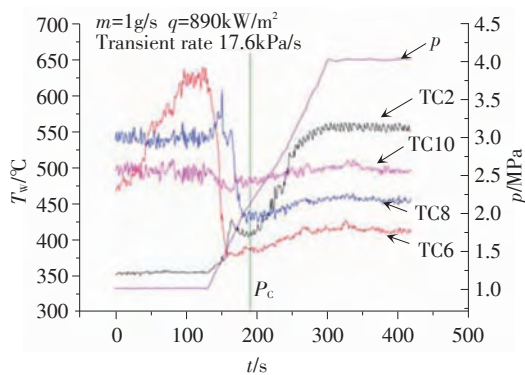


Fig. 11 Dynamic change of outside wall temperature during pressure transients

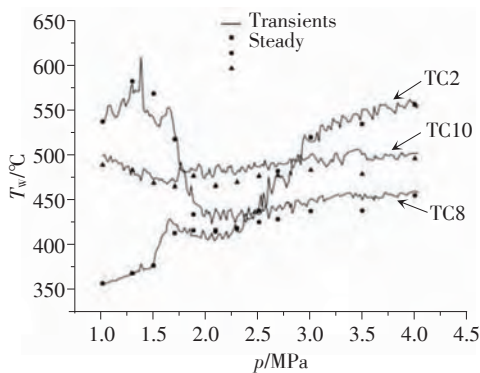


Fig. 12 Comparison of outside wall temperature between pressure transients and steady states

TC2处流体温度约为105℃,升压后壁温先上升,当压力达到1.67MPa时达到极大值,接近临界点时下降,压力超过2.34MPa后随着压力升高几乎线性上升,在临界点附近时达到最低。这是因为压力较低时随着压力升高过冷沸腾受到抑制,壁温上升,壁温下降可能是流动向湍流转化的结果,超临界时迅速上升则是流动层流化引起了传热恶化。

TC6处流体温度约为280℃,在亚临界稳态时壁面覆盖的气膜不稳定,壁温有较大波动,进入超临界后波动消失。

TC8处流体温度约为360℃,亚临界压力较低时

处于膜态沸腾区。升压时温度先升高,压力达到1.4MPa后迅速下降,超过1.9MPa后基本维持稳定。压力对膜态沸腾影响很大,在1.9MPa后即可认为膜态沸腾消失。

TC10处壁温随着压力升高变化不大。

将TC2,TC8,TC10动态变化中的外壁温度与稳态时不同压力下作对比,图12中可以看出其变化趋势是一致的,超临界时稳态的壁温比动态变化时低,表示其传热要好于动态变化时。由于经验公式缺乏,其定量关系还需做进一步分析。稳态实验一般是选择少量的实验工况来进行换热分析,本文中的动态变化分析可以更详细地给出变化过程中的壁温变化,也可以为研究工况选取提供指导。

压力从亚临界至超临界的动态变化过程中,不同换热区域处的壁温变化有很大不同,说明压力在碳氢燃料从亚临界到超临界变化过程中起重要作用。图11中壁温的动态变化过程显示在压力升高过程中壁温并不是单调变化的,总的来说,压力的升高会减弱入口段的换热,抑制在中间段可能出现的传热恶化,对出口处的换热则影响不大,压力超过临界点后会使得亚临界时发生的传热不稳定消失。在动态变化过程中,亚临界区域内壁温变化呈现非单调特性,特别在流体温度接近饱和温度的膜态沸腾区会出现比初始低压力下更高的壁温,虽然其最终状态时壁温是显著下降的。

### 3.2.2 压力变化速率的影响

为了研究变化速率对传热的影响,本文进行了不同压力变化速率的实验,并选取了TC2、TC8和TC10处壁温随压力的变化制成曲线,其中TC10处壁温变化不明显,而TC2和TC8处变化是非单调的。见图13~15。

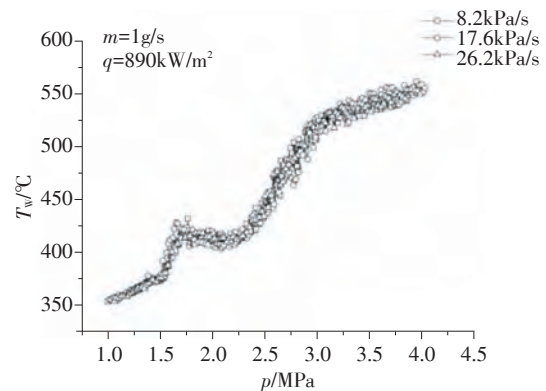


Fig. 13 Variation of outside wall temperature of TC2 at pressure transient rates

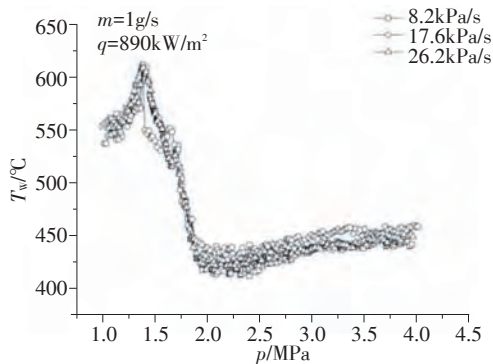


Fig. 14 Variation of outside wall temperature of TC8 at pressure transient rates

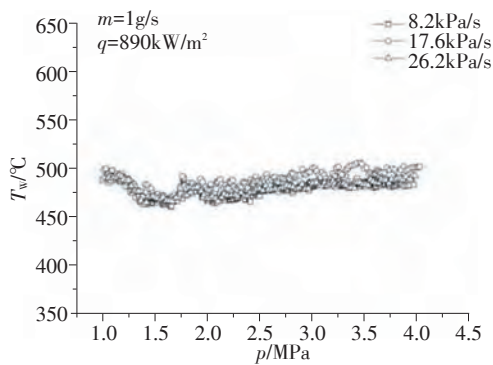


Fig. 15 Variation of outside wall temperature of TC10 at pressure transient rates

图中显示三条曲线都几乎重合,对其它测温点进行类似分析时结果相似,表明变化速率对换热影响不大,文献[17]中也有类似研究结果。

## 4 结论

碳氢燃料在流动过程中会发生传热恶化现象,本文讨论了其在不同压力下的传热机理,并得到了压力缓慢变化过程中壁温的动态变化,研究了变化速率对换热的影响:

(1)亚临界压力较低时实验段中部发生的传热恶化是膜态沸腾,随着压力升高其恶化程度减轻,随着热流增加其恶化点前移,随着质量流量增加恶化点后移,热流和流量对其恶化程度影响不大。

(2)超临界时发生在入口处的传热恶化是由于流动层流化,随着压力升高其恶化程度加重,随着热流密度加大其恶化程度也加重,但热流增大至一定程度后其影响变小;质量流量对恶化程度影响不大。

(3)超临界压力下稳态的传热优于动态变化时的传热,使用稳态下的理论分析时会高估冷却效果。

(4)压力变化过程中壁温的变化并不是单调的,在亚临界区域内壁温可能出现先上升后下降的变化,特别是在流体温度接近饱和温度的膜态沸腾区,壁温会出现比初始和最终状态都高的情况,此时应注意防止壁面超温。

(5)压力变化速率对传热的影响不大。

致谢:感谢刘朝晖老师和毕勤成老师在论文撰写中给予的帮助。

## 参考文献:

- [1] 李中洲,朱惠人. 煤油在微小圆管内传热研究[J]. 机械设计与制造, 2010, 9: 112-113.
- [2] 罗毓珊,陈听宽,胡志宏,等. 高参数小管径内煤油的传热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(4): 609-612.
- [3] 王英杰,徐国强,邓宏武,等. 超临界RP-3管内换热特性实验[J]. 推进技术, 2009, 30(6): 656-660. (WANG Ying-jie, XU Guo-qiang, DENG Hong-wu, et al. Experimental Investigation on Heat Transfer of Supercritical RP-3 [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(6): 656-660.)
- [4] 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.
- [5] 周伟星,鲍文,段艳娟,等. 超临界条件下管内碳氢燃料结焦换热研究[C]. 郑州:中国工程热物理学会传热传质学术年会, 2008.
- [6] 张磊,乐嘉陵,张若凌,等. 超临界压力下湍流区碳氢燃料传热研究[J]. 推进技术, 2012, 34(1): 107-111. (ZHANG Lei, LE Jia-ling, ZHANG Ruo-ling, et al. Heat Transfer of Hydro-Carbon Fuel in Turbulent Flow Region under Supercritical Pressure[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 34(1):107-111.)
- [7] 毕勤成,苏前华,雷胜辉. 超临界压力下特种煤油在微小通道内换热及热沉研究[C]. 大庆:中国工程热物理学会多相流学术会议, 2007.
- [8] Liu Z H, Bi Q C, Guo Y, et al. Convective Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Near-Critical-Pressure Hydrocarbon Fuel in a Minichannel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 51: 1047-1054.
- [9] Zhong F Q, Fan X J, Yu G, et al. Heat Transfer of Aviation Kerosene at Supercritical Conditions [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2009, 23(3): 543-550.
- [10] Wang H J, Luo Y S, Gu H F, 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 Sci-*

- ence, 2012, 42: 16-24.
- [ 11 ] Wang Y Z, Hua Y X, Meng H. Numerical Studies of Supercritical Turbulent Convective Heat Transfer of Cryogenic-Propellant Methane [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfe*, 2010, 24(3): 490-500.
- [ 12 ] 鲍文, 李献领, 徐志强, 等. 超临界碳氢燃料流动换热的仿真研究 [J]. *热能动力工程*, 2012, 27(1): 107-111.
- [ 13 ] 李勋锋, 仲峰泉, 范学军, 等. 超临界压力下航空煤油圆管流动和传热的数值研究 [J]. *推进技术*, 2010, 31(4): 467-472. (LI Xun-feng, ZHONG Feng-quan, FAN Xue-jun, et al. Numerical Study of Convective Heat Transfer of Aviation Kerosene Flows in Pipe at Supercritical Pressure [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(4): 467-472.)
- [ 14 ] 胡志宏, 陈听宽, 罗毓珊, 等. 高热流条件下超临界压力煤油流过小直径管的传热特性 [J]. *化工学报*, 2002, 53(2): 134-138.
- [ 15 ] 李中洲, 朱惠人. 超临界压力下航空煤油传热特性 [J]. *推进技术*, 2011, 32(2): 261-265. (LI Zhong-zhou, ZHU Hui-ren. Heat Transfer Characteristics of Kerosene in Micro-Channel Under Supercritical Pressure [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(2): 261-265.)
- [ 16 ] Liu Z H, Bi Q C, Guo Y, et al. Heat Transfer Characteristics During Subcooled Flow Boiling of a Kerosene Kind Hydrocarbon Fuel in a Imm Diameter Channel [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(19-20): 4987-4995.
- [ 17 ] Kang K H, Chang S H. Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics During the Pressure Transients Under Supercritical Pressures [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52: 4946-4955.
- [ 18 ] Li X F, Huai X L, Cai J, et al. Convective Heat Transfer Characteristics of China RP-3 Aviation Kerosene at Supercritical Pressure [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(14-15): 2360-2366.

(编辑:张荣莉)