

跨临界碳氢二元混合物的水动力学与 传热特性实验研究

杨竹强, 李天卉, 高天泽, 韩瑞岩, 张博, 刘峰

(大连理工大学能源与动力学院, 116024, 辽宁大连)

摘要: 针对超燃冲压发动机热防护所采用的再生主动冷却技术中的流动不稳定问题,对亚超临界二元碳氢混合物的流动及传热特性进行了实验研究。基于流动方向对水动力学特性影响的实验结果,即水平管路较垂直管路更容易发生静态不稳定现象,研究了水平管内不同混合比例的二元混合物的水动力学及传热特性。结果显示:流动不稳定起始点(OFI)与换热过程极值点对应,说明水动力学特性与其换热过程具有耦合关系;二元混合物的水动力学特性基本规律与纯物质相同,增加易挥发物的比例会使 OFI 对应的质量流量向更大的方向移动。通过包含 3 个对 OFI 有影响的参数的两组无量纲数对混合物流动不稳定起始点进行线性拟合,得到了混合物的静态不稳定区间的起始边界。此项研究将 OFI 与传热过程进行耦合分析,对预测混合物的流动不稳定边界以及发动机主动冷却技术的通道设计具有参考价值。

关键词: 水动力学;传热;二元混合物;超临界;小通道

中图分类号: TK24 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202006018 **文章编号:** 0253-987X(2020)06-0140-08



OSID 码

Experimental Study on Hydrodynamic and Heat Transfer Characteristics of Binary Mixtures at Trans- and Supercritical Pressures

YANG Zhuqiang, LI Tianhui, GAO Tianze, HAN Ruiyan, ZHANG Bo, LIU Feng

(School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: To solve the problems of flow instability in regenerative active cooling technology used in the thermal protection of scramjet, the hydrodynamic and heat transfer characteristics of binary hydrocarbons are experimentally studied. Based on experimental results from the influence of flow directions on hydrodynamic characteristics, that is a horizontal tube is more prone to static instability than a vertical tube, the hydrodynamic and heat transfer characteristics of binary mixtures with different mixing ratios in horizontal tubes are studied. The results show that the onset of instability (OFI) corresponds to the extreme value of heat transfer coefficient. It can be concluded that the heat transfer characteristics have coupling relationship with hydrodynamic characteristics; regularities of the hydrodynamic characteristics of binary mixtures are similar with those of pure substance; increasing the blending ratios of volatile substance makes the mass flow rate corresponding OFI move in a larger direction. Two dimensionless numbers containing three parameters affecting OFI are used to obtain the onset instability boundary correlation by liner fitting method for mixtures. The coupling analysis of OFI with the heat transfer process is

of guiding significance for predicting the onset instability of mixtures and channel design of the engine active cooling technology.

Keywords: hydrodynamic characteristics; heat transfer; binary mixture; supercritical pressure; mini-tube

从20世纪60年代起,为了不断满足推进系统高机动性与高巡航速度的要求,超声速燃烧冲压发动机成为各国的研究热点^[1-2]。为了应对超高压力与高热载荷挑战,有学者提出利用冷态机载燃油流经布满小通道的高温发动机表面来冷却发动机^[3],这种方法被称为“再生主动冷却技术”。再生主动冷却技术不仅高效解决了飞机发动机表面的过热问题,也使机载燃油充分预热,大大提高了燃烧效率^[4]。然而,这种技术面临燃油在多通道内分布不均匀的情况^[5-6],极易引发流动不稳定。由流量不均匀性引起的局部热点和机械振动将严重影响飞机飞行安全。

针对流动不稳定特性,学者们开展了关于流动不稳定性与换热特性的相关研究,其中,流动不稳定性被分为静态与动态不稳定性。Ledinegg最早发现管路内部压降与流量之间存在三次曲线关系^[7],这种不稳定性被命名为静态不稳定特性,通常用水动力学特性曲线描述,其中水动力学特性曲线是静态不稳定特性的必要条件之一^[8]。针对水动力学特性,学者在亚临界与超临界压力下开展了大量研究,Mahmoudi等认为流体密度的急剧变化是引起水动力学特性的重要原因之一^[9-10];学者们也得出了抑制水动力学特性的基本规律,即增大压力和入口温度,减小热流密度能使系统更加稳定。Chatoorgoon使用线性不稳定程序,研究了超临界CO₂与水的静态不稳定性,发现温度阈值使低于该温度的向下流动更易发生静态不稳定^[11]。Ambrosini等人基于适用于两相流的 N_{pch} 与 N_{sub} 提出使用 N_{TPC} 与 N_{SPC} 来表示超临界CO₂、R23和氨水的流动不稳定区间^[12-13]。Guo等研究了碳氢燃料在亚临界到超临界的水动力学特性,认为沸腾和拟临界温度下的拟沸腾现象是负斜率产生的原因^[14]。Yang等人采用实验手段研究了环己烷的流动不稳定起始边界并且拟合出流动不稳定起始点的关联式^[15-16]。对于纯物质水动力学特性的研究,学者们重点关注水、CO₂或纯制冷剂^[17-23]。对于选用航空煤油作为工质的研究,由于煤油是由几十种有机物组合而成的混合物,在极限条件下容易发生结焦或者热裂解等化学反应,导致流动与传热不稳定,且通常伴随振荡现

象^[24-25],因此通常将煤油看作新定义的纯物质进行研究,通过状态方程和吉布斯自由能公式计算其物性。这种处理方式虽然能简化其中复杂的流动和传质过程,但是却很难分析混合比例对流动传热特性的影响。

目前对于二元混合工质的研究主要集中在亚临界压力下的二元混合制冷剂。学者发现由于传质阻力混合物的流型转变起始点存在滞后现象^[26-30],而制冷剂并非煤油的成分,因此对于碳氢燃料二元混合工质,尤其是在拟临界温度区间的流动传热特性,其结论还需进一步验证。此外,虽然学者们针对水动力学特性建立了很多相关模型与预测关联式,但是对于水动力学特性过程中换热过程的分析较少,且目前针对流动不稳定性与传热的研究主要集中在参数的振荡现象。随着如密度波、压力波或者流量振荡所导致的特殊传热现象对设备造成的不利影响的出现^[28,31-32],需要对水动力学特性对应的换热过程进行分析。

基于对上述文献的分析,本文选取环己烷、正戊烷及其混合物为工质,通过实验探究流向对于水动力学特性的影响;分析二元混合物的水动力学特性,讨论其与传热的耦合特性;通过分析实验结果,提出预测混合物流动不稳定起始边界的方法,给出其不稳定边界的预测关联式,最终为亚临界和超临界压力下主动冷却技术中的管路与工况设计提供理论指导。

1 实验系统及数据处理

1.1 实验系统

实验所采用的实验台系统简图如图1所示。工质经过恒流泵(Elite, P500, 0~500 mL/min, 3%)流入预热段加热到所需入口温度,再经过实验段进行加热,最终经过水冷却流回燃料桶进行下一次循环。体积流量计(CX-M5-SS, 0~500 mL/min, 0.5%)放置在预热段入口前用于测量流量,采用交流电加热系统将流体加热到指定功率。流体温度采用铠装K型热电偶(Omega, 0~590 °C, 0.4%)测量,分别布置在实验段入口和出口位置。管壁温度采用9个K型热电偶焊接在管壁外侧进行测量。壁面处热电偶

的焊接间距为(以 670 mm 管路为例):入口和出口处布置间距 15 mm,中间部分间距 80 mm。实验段管路内部压降采用压差传感器(Rosemount 3051CD4,0~1000 kPa,0.075%)测得。所有的测量参数都通过数据采集系统(Keithley 2700,1%)在稳态下进行采集。

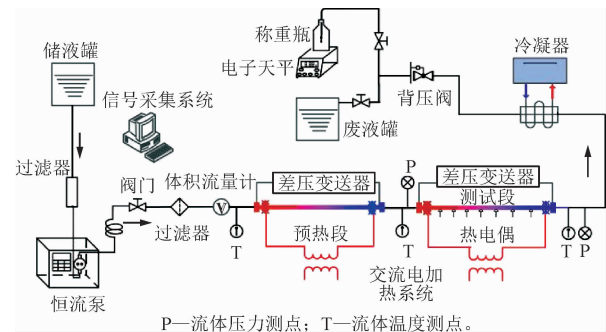


图 1 实验台系统简图

实验管路由 316 型不锈钢管连接,并用玻璃棉覆盖,以减少热损。对于每一种工质,分别在亚临界压力和超临界压力下进行热流密度和入口温度的实验,以便进行比较。此外,实验过程中逐步减小流量而保证其他参数不变,以获得水动力学特性曲线。由于采用恒流泵,因此实验过程中不会发生流量漂移。

实验选取碳氢化合物环己烷(摩尔分数为 99.5%)和正戊烷(摩尔分数为 99.5%)及其 3 种混合物(质量分数分别为 Mix1:70%环己烷+30%正戊烷;Mix2:50%环己烷+50%正戊烷;Mix3:30%环己烷+70%正戊烷)作为实验工质。工质的临界参数由 NIST 数据库查得,如表 1 所示。为了确保实验工质不发生裂解以及实验安全,实验过程中严格控制出口流体的温度低于 420 ℃,壁面温度低于 540 ℃。实验所需工况如表 2 表示。

表 1 工质的基本临界参数

工质	临界压力 p_{cr}/MPa	临界温度 $t_{pc}/\text{℃}$
环己烷	4.05	280.40
Mix1	3.90	252.59
Mix2	3.75	235.15
Mix3	3.60	218.45
正戊烷	3.37	196.60

1.2 数据处理与不确定度分析

流体吸收的有效热流密度

$$q_{\text{eff}} = \frac{IU - Q_{\text{loss}}}{1\,000\pi DL} \tag{1}$$

式中: I 为输入电流; U 为输入电压; D 为管路外径;

表 2 实验工况参数

参数	数值
环己烷质量分数/%	0,30,50,70,100
压力/MPa	2.5~4.5
入口温度/℃	30~50
热流密度 $q/(\text{kW}\cdot\text{m}^{-2})$	155~381
测试管内径 d/mm	2.0
测试管长度 L/mm	600,670

L 为实验段管长; Q_{loss} 为实验段热量损失,计算公式为

$$Q_{\text{loss}} = -20.618 + 0.296t - 7.650 \times 10^{-4}t^2 + 1.691 \times 10^{-6}t^3 - 7.074 \times 10^{-10}t^4 \tag{2}$$

其中, t 为测试温度。 Q_{loss} 控制在总加热量的 6%以内。根据主流焓在 NIST 中查得主流温度,流体焓的计算公式为

$$h_b(x) = h_{b,\text{in}} + \frac{IU - Q_{\text{loss}}}{m_{\text{in}}} \frac{x}{L} \tag{3}$$

式中: $h_{b,\text{in}}$ 为入口焓; m_{in} 为质量流量; x 为测温点的分布位置。

管路的内壁温度 $t_{\text{wi}}(x)$ 可由外壁温度 $t_{\text{wo}}(x)$ 和管内热源计算得出

$$t_{\text{wi}}(x) = t_{\text{wo}}(x) + \frac{q_v(x)}{16\lambda}(D^2 - d^2) + \frac{q_v(x)D^2}{8\lambda}\ln\left(\frac{d}{D}\right) \tag{4}$$

式中: λ 为 316 型不锈钢的导热系数;管内热源 $q_v(x)$ 的计算公式如下

$$q_v(x) = \frac{IU - Q_{\text{loss}}}{x[\pi(D^2 - d^2)/4]} \tag{5}$$

实验段出口处的局部沸腾换热系数是基于有效热流密度计算出来的,公式如下

$$h = \frac{q_{\text{eff}}}{t_{\text{wi}} - t_b} \tag{6}$$

因此,局部沸腾换热系数的不确定度为

$$\frac{\Delta h}{h} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial q_{\text{eff}}}{q_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial t_w}{t_w - t_b}\right)^2} \tag{7}$$

式中: t_w 为壁面温度; t_b 为核心区流体温度。

实验中其他参数的不确定度如表 3 所示。

表 3 系统参数的不确定度

不确定度/%								
流体温度	加热功率	体积流量	压力	压降	热流密度	质量流量	内壁面温度	传热系数
0.76	0.20	1.63	0.42	3.83	1.40	1.91	0.76	0.21

2 实验结果与讨论

为了探究流向对水动力学特性的影响,研究了不同流向下,环己烷在低/高热流密度的水动力学特性。选择 $L=0.60\text{ mm}$ 、 $d=2.0\text{ mm}$ 的不锈钢管在压力 4.5 MPa 和入口温度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行向上、向下和水平流动的研究,结果如图 2 所示,图中 k 为水动力学特性曲线的负斜率区斜率。对于相同加热量, k 的绝对值越大,意味着静态不稳定特性更容易发生。将不同流向下 k 的数值进行比较,可以看出:水平管路的 k 大于竖直管路(水平管路的 k 比竖直管路的大 $9.1\%\sim 327.9\%$),向上流动的 k 大于向下流动(向上流动的 k 比向下流动的大 $28.1\%\sim 45.9\%$),因此可以认为水平管路更易发生不稳定特性,而在竖直管路中,向上流动较向下流动更易发生流动不稳定特性。

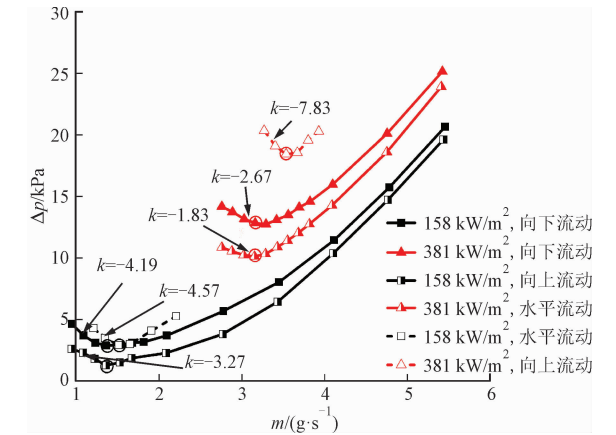


图 2 不同流向下环己烷水动力学特性曲线图

2.1 混合物的水动力学与传热特性

由于水平管比竖直管路更易发生流动不稳定特性,因此在二元混合物的流动与传热研究中,选取 $L=0.67\text{ m}$ 、 $d=2.0\text{ mm}$ 的水平管路进行研究,取 $x/L=0.98$ 处测量的壁面温度和主流流体温度计算换热系数。

以混合物 Mix1 为例,在入口温度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和热流密度 205 kW/m^2 的条件下,进行从亚临界到超临界压力下的水动力学特性实验,结果如图 3a 所示。可以看出随着压力升高,水动力学特性曲线的流动不稳定起始点(OFI)逐渐向流量减小的方向移动,这是由于压力升高使对应的饱和温度和拟临界温度升高;对于亚临界压力,当流体温度随着质量流量减小而接近饱和温度时,OFI 出现;对于超临界压力,流体温度在更小的质量流量下达到低于拟临界温度而壁面温度高于拟临界温度的条件,OFI 出现。类似

于两相流,超临界流体的水动力学特性是由拟临界温度引起的巨大物性差异,尤其是密度差异导致的。

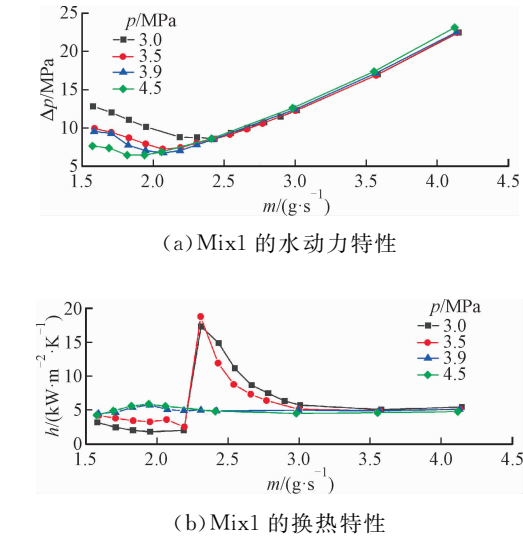


图 3 Mix1 的水动力学特性和换热特性

图 3b 展示了对应于水动力学特性曲线的换热过程。可以看出,在超临界和亚临界压力下,随着质量流量不断降低,换热系数先逐步升高,到达 OFI 附近后降低并维持稳定。由于汽化潜热的存在,亚临界压力下的换热极值远大于超临界压力下的换热系数。亚临界压力下,在换热系数降低阶段,气膜的产生导致换热系数下降,而超临界压力下换热系数下降得较为平缓。换热系数的巨大变化可以反映出物性的巨大变化,这也是引发水动力学特性的原因,因此可以通过提高系统压力使系统更加稳定。

2.1.1 亚临界压力 图 4a 为不同混合比例的工质在入口温度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、热流密度 205 kW/m^2 、亚临界压力(3.0 MPa)下的水动力学特性曲线。随着正戊烷

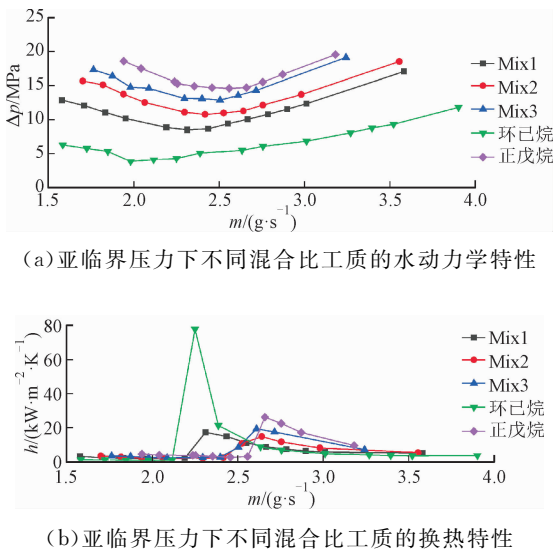


图 4 亚临界压力下不同混合比工质的水动力学和换热特性

质量分数的升高, OFI 的质量流量增加, 这是因为混合物的饱和温度随着正戊烷质量分数的增加而降低。OFI 处所对应的流体温度也相应降低。根据 $Q = m\Delta H$, 由于加热量一致, 随着正戊烷质量分数的增加, 流体温度降低, 在入口温度不变的条件下, 焓差越来越小, 因此 OFI 对应的质量流量向质量流量大的方向移动。

为了分析传热过程, 将截面处的流体分为 3 部分: 近壁处流体、核心区流体和中间层流体, 如图 5a 所示。这 3 部分流体在流动沸腾管路中持续进行热交换。定义 t_{wf} 为近壁处流体温度, t_m 为中间层流体温度, t_b 为核心区流体温度, t_{sat} 为饱和温度。传热过程以 OFI 点为界分为两个阶段, 如图 5b 所示。

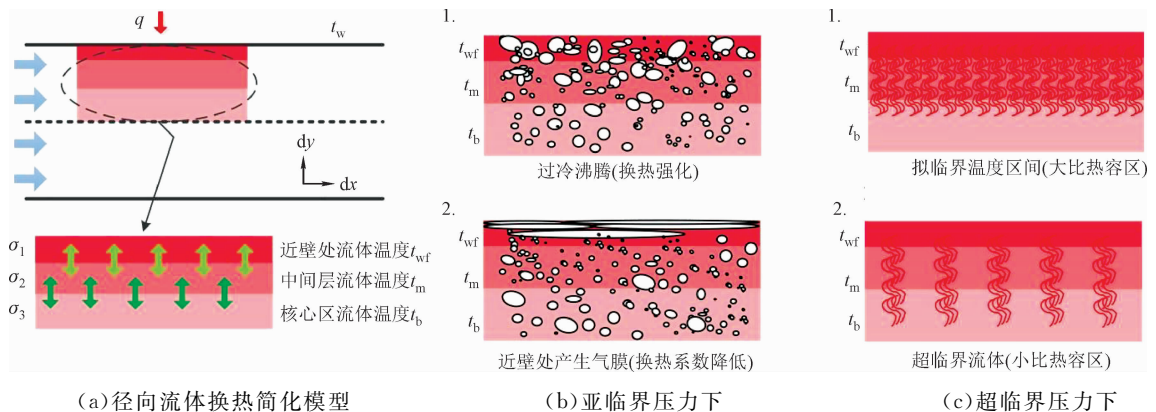
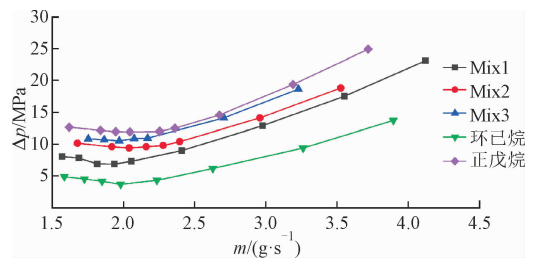


图 5 亚、超临界水动力学的换热过程模型

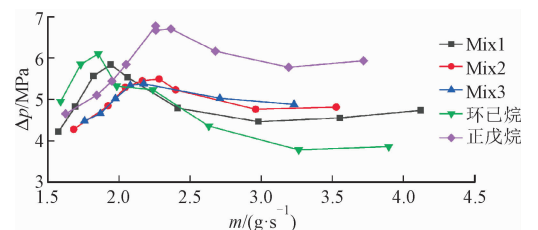
对比图 4b 中纯物质与混合物的换热系数发现: 在纯液态区, 正戊烷质量分数的增加导致换热系数不断增加; 在气态区, 正戊烷的比例变化对于换热系数几乎无影响。值得注意的是, 在 OFI 之前, 混合物换热系数的极值小于两种纯物质, 这是由于较易挥发的物质(正戊烷)阻碍了易挥发物质(环己烷)的成核和气化, 即混合物的传质阻力现象^[33], 此外不同比例混合物其换热极值点对应的质量流量不同, 这是由于不同混合比例对于饱和温度的影响导致的。

2.1.2 超临界压力 图 6a 为环己烷、正戊烷及其混合物在入口温度 30 °C、热流密度 205 kW/m²、超临界压力(4.5 MPa)下的水动力学特性曲线。可以看出, 超临界流体多值特性曲线的规律与亚临界基本一致, 但与亚临界相比, 其水动力学特性曲线的负斜率区斜率较小, 同时所有物质 OFI 发生时所对应的质量流量都向更小的流量方向移动。这是由于随着压力的升高, 拟临界温度变大, 流体进出口焓差小于亚临界压力工况条件下的焓差, 导致 OFI 发生对应的质量流量向更小值移动。

第一个阶段为质量流量逐渐减小到达 OFI 之前, 此过程中换热系数逐渐增大, $t_b < t_{sat}$, 而 $t_{wf} > t_{sat}$, 可以推断近壁处的流体引发过冷沸腾, 近壁处产生的气泡吸收了壁面的热量并向主流不断释放, 导致换热系数不断升高。当质量流量进一步减小, 主流核心区温度 t_b 达到饱和温度 t_{sat} 时, 换热过程进入第二个阶段, 此时水动力学特性曲线进入负斜率区, 对应负斜率区的换热系数突降, 这是由于近壁处流体形成了气膜阻碍壁面处的热量进一步向主流核心区传递, 在此过程中壁面和主流核心区流体温度均超过饱和温度; 随着流量的减小, 流体的黏度和表面张力减小, 气膜破碎产生过热蒸气, 使得换热系数维持在稳定的范围。



(a) 超临界压力下不同混合比工质的水动力学特性



(b) 超临界压力下不同混合比工质的换热特性

图 6 超临界压力下不同混合比工质的水动力学和换热特性

实验发现, 超临界流体与两相流体的水动力学特性和换热过程很相似。类比于两相流体, 本文将水动力学特性曲线的传热过程同样分为两个阶段,

如图 5c 所示。第一个阶段为到达 OFI 前,此过程中 $t_b > t_{pc}$, 而 $t_{wf} < t_{pc}$, 可以推测近壁处流体已经高于拟临界温度, 而主流核心区到近壁处流体间的温度梯度, 决定了中间层流体处于拟临界温度区间。近壁处的热量主要是由中间层流体的大比热区流体吸收并向主流区释放, 将导致换热系数增加, 伴随的是壁面温度缓慢升高。当质量流量进一步减小跨越 OFI 后进入第二个阶段, $t_b > t_{pc}$, 而 $t_{wf} > t_{pc}$, 此时中间层流体温度超过拟临界温度, 不在大比热区, 近壁处热量难以被吸收传递至主流, 使换热系数降低。

图 6b 表示水动力学特性曲线对应的换热特性。当液态区主流温度低于拟临界温度时, 换热的规律与亚临界压力下一致。然而, 实验中同样发现, 混合物的传热系数到达 OFI 之后显现出低于纯物质的趋势。虽然超临界中流体是均匀混合且不存在相变, 但混合物中却存在不同的物质微团。对于环己烷和正戊烷而言, 其热物性不同, 在相同的温度梯度下, 物性影响了它们的物质扩散能力和质量扩散能力。具有相同扩散能力的环己烷微团或正戊烷微团趋向聚合, 建立起浓度梯度。在超临界流体的拟气态区, 浓度梯度导致的传质阻力是影响混合物换热系数的重要因素, 这种现象与亚临界压力下由易挥发物质导致的传质阻力非常相似。

2.2 不稳定起始点边界

综上所述, 超临界压力下流体的水动力学特性与换热过程均与亚临界压力下的流体具有相似性。同时, 混合物的水动力学与换热特性均可与纯物质进行类比。但是混合比例的变化不仅影响了物性, 也增加了传质阻力。这都将影响混合物的换热系数, 也势必导致混合物流动不稳定起始边界与纯物质的不同。

对于亚临界流体, 有学者定义通过无量纲数(过冷数 N_{sub} 和相变数 N_{pch})研究流动不稳定的边界^[13]

$$N_{sub} = \frac{h_f - h_{in}}{h_{fg}} \frac{c_{fg}}{c_f} \quad (8)$$

$$N_{pch} = \frac{Q}{m_{in} h_{fg}} \frac{c_{fg}}{c_f} \quad (9)$$

式中: h_f 和 h_{in} 分别表示饱和流体焓和入口流体焓; h_{fg} 为汽化潜热; c_{fg} 为 c_g 和 c_f 的差值, c_g 和 c_f 分别代表饱和和气体比热容和饱和液体比热容; Q 为吸热量; m_{in} 为入口处质量流量。

相应地, 对于超临界流体而言, 学者们类比亚临界参数定义拟过冷数 N_{SPC} 和拟相变数 N_{TPC} 描述流动不稳定边界^[13]

$$N_{SPC} = \frac{\beta_{pc}}{c_{p,pc}} (h_{pc} - h_{in}) \quad (10)$$

$$N_{TPC} = \frac{Q}{m_{in} c_{p,pc}} \quad (11)$$

式中: β_{pc} 为拟临界膨胀系数; $c_{p,pc}$ 是临界比热容; h_{pc} 为临界处焓。

对于两种纯物质和它们的混合物, 4 个无量纲数包含压力、热流密度、入口温度和 OFI 对应的质量流量。以图 7 可以看出, 混合物的不稳定起始点基本位于两种纯物质的流动不稳定起始点之间, 因此可以推测环己烷与正戊烷的混合物不论以何种比例混合, 其流动不稳定起始边界均应位于环己烷和正戊烷起始边界之间。由图 7 右下角示意图可以看出混合物的不稳定边界与两种纯物质之间的关系, 可以认为实线左侧为稳定区, 实线右侧为不稳定区。

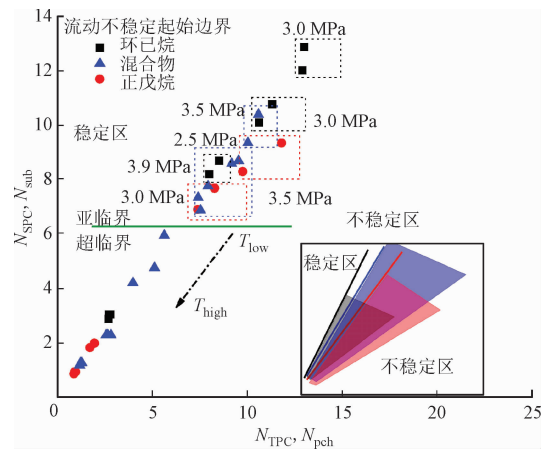


图7 混合物与纯物质的流动不稳定起始点在亚临界与超临界下的稳定边界

由于点的分布具有线性关系, 将数据进行线性拟合, 得出混合物的流动不稳定起始边界。

$$N_i = 0.948 N_j - 0.049 \quad (12)$$

式中: $i = SPC, sub; j = TPC, pch$ 。式(12)的使用范围为: $2.5 \text{ MPa} < p < 4.5 \text{ MPa}$, $30^\circ\text{C} < T_{in} < 50^\circ\text{C}$, $155 \text{ kW/m}^2 < q < 381 \text{ kW/m}^2$ 。此外, 如果已知两种纯物质的流动不稳定起始边界, 可以粗略地估计出其混合物的流动不稳定边界。

3 结论

本文针对水平管路进行了环己烷、正戊烷及其二元混合物的流动实验研究, 通过分析水动力学特性及换热特性, 得出以下的结论。

(1) 对于混合物, 其水动力学多值特性与纯物质具有相似性。不同压力下, 混合物与纯物质水动力

学特性整体规律一致;换热过程的变化与流动不稳定性起始点相关,具有耦合特性。

(2)增大低临界参数物质的质量分数,会使 OFI 发生时的质量流量向大质量流量的方向移动。

(3)混合物的换热系数低于纯物质,这是由于亚临界压力下易挥发的组分先挥发和超临界压力下存在浓度梯度导致的传质阻力引起的。

(4)降低系统压力、增大入口温度、增大热流密度,会使得负斜率起始点对应的质量流量向高质量流量方向移动。相反地,减小管长和管径将促使 OFI 向低质量流量方向移动。

(5)提出了预测二元混合工质的静态不稳定性起始边界的方法,获得了适用亚临界至超临界的二元混物流动不稳定性边界的预测公式。

参考文献:

- [1] ANDREWS E. Scramjet development and testing in the United States [C]// International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Reston, VA, USA: AIAA/NAL-NASDA-ISAS, 2001: 2-20.
- [2] POWELL O A, EDWARDS J T, NORRIS R B, et al. Development of hydrocarbon-fueled scramjet engines; the hypersonic technology (HyTech) program [J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(6): 1170-1176.
- [3] 崔尔杰. 近空间飞行器研究发展现状及关键技术问题 [J]. 力学进展, 2009, 39(6): 20-35.
CUI Erjie. Development trends and key technical problems of near space flying vehicles [J]. Advance in Mechanics, 2009, 39(6): 20-35.
- [4] YAN Junjie, ZHU Yinhai, ZHAO Ran, et al. Experimental investigation of the flow and heat transfer instabilities in n-decane at supercritical pressures in a vertical tube [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2018, 120: 987-996.
- [5] CHEN Yu, WANG Yu, BAO Zewei, et al. Numerical investigation of flow distribution and heat transfer of hydrocarbon fuel in regenerative cooling panel [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98: 628-635.
- [6] YU Feng, JIANG Qin, WEN Bao, et al. Numerical analysis of convective heat transfer characteristics of supercritical hydrocarbon fuel in cooling panel with local flow blockage structure [J]. Journal of Supercritical Fluids, 2014, 88(2): 8-16.
- [7] LEDINEGG M. Instability of flow during natural and forced circulation [J]. Die Wärme, 1938, 61(8): 891-898.
- [8] PADKI M M, PALMER K, KAKAÇ S, et al. Bifurcation analysis of pressure-drop oscillations and the Ledinegg instability [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1992, 35(2): 525-532.
- [9] MAHMOUDI J. Experimental thermal-hydraulic study of a supercritical CO₂ natural circulation loop [D]. Manitoba, Canada: University of Manitoba, 2014: 86-95.
- [10] SWAPNALEE B T, VIJAYAN P K, SHARMA M, et al. Steady state flow and static instability of supercritical natural circulation loops [J]. Nuclear Engineering & Design, 2012, 245: 99-112.
- [11] CHATOORGOON V. Non-dimensional parameters for static instability in supercritical heated channels [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2013, 64: 145-154.
- [12] AMBROSINI W. Assessment of flow stability boundaries in a heated channel with different fluids at supercritical pressure [J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, 38(2): 615-627.
- [13] AMBROSINI W, SHARABI M. Dimensionless parameters in stability analysis of heated channels with fluids at supercritical pressures [J]. Nuclear Engineering & Design, 2008, 238(8): 1917-1929.
- [14] GUO Yong, BI Qincheng, LIU Zhaohui, et al. Experimental investigation on thermal-hydraulic characteristics of endothermic hydrocarbon fuel in 1 mm and 2 mm diameter mini-channels [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 122: 420-428.
- [15] YANG Zhuqiang, SHAN Yafei. Experimental study on the onset of flow instability in small horizontal tubes at supercritical pressures [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 135: 504-511.
- [16] YANG Zhuqiang, SHAN Yafei, ZHANG Bo, et al. Hydrodynamic characteristics of cyclohexane in a horizontal mini-tube at trans-and supercritical pressures [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129: 62-69.
- [17] CAO L, KAKAÇ S, LIU H T, et al. The effects of thermal non-equilibrium and inlet temperature on two-phase flow pressure drop type instabilities in an upflow boiling system [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2000, 39(9): 886-895.
- [18] CHIAPERIO E M, DODER D, FERNANDINO M, et al. Experimental parametric study of the pressure drop characteristic curve in a horizontal boiling channel [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2014, 52(2): 89-98.

- 318-327.
- [19] STODDARD R M, BLASICK A M, GHIAASIAAN S M, et al. Onset of flow instability and critical heat flux in thin horizontal annuli [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2002, 26(1): 1-14.
- [20] ZHANG Tiejun, TONG Tao, CHANG Jeyoung, et al. Ledinegg instability in microchannels [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2009, 52(25): 5661-5674.
- [21] HOLDYCH D J, GEORGIADIS J G, BUCKIUS R O. Hydrodynamic instabilities of near-critical CO₂ flow in microchannels: lattice Boltzmann simulation [J]. *Physics of Fluids*, 2004, 16(5): 1791-1802.
- [22] 黄凡, 罗毓珊, 陈听宽, 等. 低质量流速垂直并联内螺旋管中两相流不稳定性试验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2009, 43(7): 36-39.
- HUANG Fan, LUO Yushan, CHEN Tingkuan, et al. Experimental study on two-phase flow instabilities in parallel vertical internally ribbed tubes at low mass flux [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2009, 43(7): 36-39.
- [23] 陈听宽, 田永生, 毕勤成, 等. 600 MW 超临界压力直流锅炉水冷壁水动力不稳定性研究 [J]. *锅炉技术*, 1990(11): 1-14.
- [24] EDWARDS T, ZABARNICK S. Supercritical fuel deposition mechanisms [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1993, 32(12): 3117-3122.
- [25] 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.
- [26] DANG Chao, JIA Li, PENG Qi, et al. Experimental and analytical study on nucleate pool boiling heat transfer of R134a/R245fa zeotropic mixtures [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2018, 119: 508-522.
- [27] DANG Chao, JIA Li, XU Mingcheng, et al. Experimental study on flow boiling heat transfer for pure and zeotropic refrigerants in multi-microchannels with segmented configurations [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2018, 127.
- [28] DANG Chao, JIA Li, XU Mingchen, et al. Experimental study on flow boiling characteristics of pure refrigerant (R134a) and zeotropic mixture (R407C) in a rectangular micro-channel [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017, 104: 351-361.
- [29] KONDOU C, BABA D, MISHIMA F, et al. Flow boiling of non-azeotropic mixture R32/R1234ze(E) in horizontal microfin tubes [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36(8): 2366-2378.
- [30] 代宝民, 李敏霞, 吕佳桐, 等. 超临界 CO₂/R41 小通道内的换热特性 [J]. *化工学报*, 2015, 66(3): 924-931.
- DAI Baomin, LI Minxia, LÜ Jiatong, et al. Heat transfer characteristics of supercritical CO₂/R41 flowing in mini-channel [J]. *CIESC Journal*, 2015, 66(3): 924-931.
- [31] HITCH B, KARPUK M. Experimental investigation of heat transfer and flow instabilities in supercritical fuels [C]// *Proceedings of the Joint Propulsion Conference & Exhibit*. Reston, VA, USA: AIAA, 2013: 97-3043.
- [32] ZHU Yin Hai, ZHAO Ran, WANG Yusen, et al. Investigation of flow and heat transfer instabilities and oscillation inhibition of n-decane at supercritical pressure in vertical pipe [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 161: 114143.
- [33] LI Minxia, DANG Chaobin, HIHARA Eiji. Flow boiling heat transfer of HFO1234yf and R32 refrigerant mixtures in a smooth horizontal tube: Part I Experimental investigation [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2012, 55 (13/14): 3437-3446.

(编辑 亢列梅)