

超(近)临界压力航空煤油 RP-3 的 拟过冷沸腾传热特性^{*}

刘朝晖, 宋晨阳, 陈 强, 张赞坚, 毕勤成

(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)

摘 要: 为了研究吸热型碳氢燃料在新型飞行器中的再生冷却性能, 采用电加热方式, 在热流密度 $0.1\sim 1.0\text{MW/m}^2$ 和质量流速 $500\sim 1000\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 条件下, 小通道圆管内 ($D=1.6\text{mm}$) 研究了超(近)临界压力下 ($p=3\text{MPa}$) 航空煤油 RP-3 的拟沸腾流动传热特性。研究发现了超(近)临界压力航空煤油的拟过冷沸腾传热现象。拟过冷沸腾壁温变化特征和传热恶化特征与亚临界压力下的相应特征存在差异。超临界压力航空煤油传热区域划分为类液态强制对流传热区、拟过冷沸腾区和类气态强制对流传热区。拟过冷沸腾壁温和传热系数随流体温度升高而缓慢增加, 起到传热强化的作用; 拟临界温度区域, 存在传热系数极小值点, 燃料发生传热弱化; 燃料温度高于拟临界温度, 燃料处于超临界类气态, 传热大幅强化。

关键词: 再生冷却; 航空煤油; 超临界; 拟沸腾; 传热恶化

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2021) 06-1418-07

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190668

Pseudo Subcooled Boiling Heat Transfer Characteristics of Aviation Kerosene RP-3 under Super- and Near-Critical Pressure Conditions

LIU Zhao-hui, SONG Chen-yang, CHEN Qiang, ZHANG Zan-jian, BI Qin-cheng

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

Abstract: In order to research the regenerative cooling performance of endothermic fuel in new vehicles, the pseudo-boiling heat transfer characteristics of super- and near-critical ($p=3\text{MPa}$) aviation kerosene RP-3 in an electrically heated small circular tube (Internal diameter $D=1.6\text{mm}$) were experimentally investigated at the operating conditions with heat fluxes of $0.1\sim 1.0\text{MW/m}^2$ and mass fluxes of $500\sim 1000\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$. It found that a phenomenon of pseudo subcooled cooling boiling heat transfer occurred at super- and near-critical pressure conditions. But the wall temperature behaviors and heat transfer deterioration appearances in the process of pseudo-boiling have some differences from those at the subcritical pressure boiling conditions. The heat transfer characteristics of supercritical pressure aviation kerosene can be divided into three regions, including the liquid-like forced convection heat transfer, pseudo subcooled boiling heat transfer and gas-like forced convection heat transfer. During pseudo-boiling the wall temperature and heat transfer coefficient slowly increased with the increasing fluid temperature, and the heat transfer enhancement occurred. In the pseudo-critical temperature region, a heat

^{*} 收稿日期: 2019-09-29; 修订日期: 2020-01-10。

基金项目: 国家自然科学基金 (51776167)。

通讯作者: 刘朝晖, 博士, 副教授, 研究领域为飞行器再生冷却与碳氢燃料热物性测量。E-mail: zh_liu@xjtu.edu.cn

引用格式: 刘朝晖, 宋晨阳, 陈 强, 等. 超(近)临界压力航空煤油 RP-3 的拟过冷沸腾传热特性[J]. 推进技术, 2021, 42(6): 1418-1424. (LIU Zhao-hui, SONG Chen-yang, CHEN Qiang, et al. Pseudo Subcooled Boiling Heat Transfer Characteristics of Aviation Kerosene RP-3 under Super- and Near-Critical Pressure Conditions [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(6): 1418-1424.)

transfer reduction existed with a minimum heat transfer coefficient value in the heat transfer curve. While the fuel temperature was above the pseudo-critical temperature, the fuel was at the supercritical gas-like condition and the heat transfer was greatly strengthened.

Key words: Regenerative cooling; Aviation kerosene; Supercritical; Pseudo-boiling; Heat transfer deterioration

1 引言

在空天高超声速飞行器中,部分设备所处热环境常在极端热流条件下,合适的热防护是保证设备安全运行的必要措施^[1-2]。近年来,再生冷却技术得到广泛关注和研究,包括推力室传热^[3]、冷却通道内传热恶化^[4]、火箭发动机再生冷却^[5]、冷却通道流量分配特性^[6]、冷却通道单侧加热传热特性^[7]等。主动冷却技术研究过程中常常面临极端热环境、多因素耦合、多学科交叉等复杂问题。主动冷却工质常涉及到多相、多组分、高温裂解条件下的流动与传热等科学与技术难题^[1-2]。

超临界流体存在特别的性质,如在拟临界温度附近存在大比热区,流体热物性变化规律复杂,故导致流体的流动传热也复杂多变,研究人员就超临界流体传热机理尚未达成共识。近几年来,对超临界流体的认识取得了重要成果。Simeoni等^[8]于2010年通过X射线散射和分子模拟方法证明了Widom line (WL)将超临界流体分成类液态和类气态两个区域,而不是单相均质。Yoon等^[9]于2019年通过算法定义了WL,超临界类气态和类液态的共存区。Ha等^[10]于2018年证明了超临界类气态和类液态在一定的温度区间内共存,且温度区间包含了WL。Banuti^[11]研究表明当流体跨越WL从超临界类液态进入超临界类气态区域,流体发生了拟沸腾;拟沸腾过程中,流体吸收的能量不仅要用作克服气化潜热,还要用作流体的温升。Maxim等^[12]于2019年在期刊《Nature communication》上发表研究成果通过中子照相技术观察到了水跨越WL发生的拟沸腾现象。Kim等^[13]于2019年研究了湍流通道内的超临界拟沸腾效应。以上研究成果为本文航空煤油 RP-3 的拟沸腾传热特性研究奠定基础。

航空煤油 RP-3 是由多种碳氢化合物组成的混合物,且成分复杂。一般来说,由质量分数 53% 的链烷烃、39% 的环烷烃、5% 的苯类芳香烃和 3% 的萘类芳香烃组成^[14]。Wang等^[15]通过临界乳光法得到 RP-3 的临界压力为 2.3MPa,临界温度为 652K。不同于纯净物,其汽化温度是一个温度区间,而不是一个温

度点。因此,其临界点附近区域的流动特性与传热特性更加复杂多变^[4,14-18]。

Liu等^[19]发现在亚临界压力条件下高热流密度通道内的碳氢燃料发生过冷沸腾传热,壁温与压力、质量流速呈现函数关系,几乎不受流体温度和热流密度的影响。充分发展过冷沸腾的典型特征:传热系数受到热流密度和质量流速的显著影响^[20],随着热流密度和质量流速的增加而增加。在超临界压力(3MPa)下,碳氢燃料在拟临界温度点附近发生传热恶化,具有传热系数极小值;随着压力增加,传热恶化消失,传热系数极小值点消失^[21]。

航空煤油 RP-3 作为吸热型碳氢燃料的典型研究对象,其传热特性在近年来得到关注和研究。Zhong等^[14]发现航空煤油 RP-3 在超临界压力下的流动传热分成两个区域:其中高雷诺数区域的传热系数明显大于低雷诺数区域,高低雷诺数区域的努塞耳数分别与雷诺数呈线性增加的关系,且温度大于 600K,高雷诺数区域的传热大幅强化。Zhang等^[16]研究了超临界压力(5MPa)航空煤油 RP-3 的传热特性,其内壁温沿轴向变化较小,但随热流密度显著增加;热流密度从 300kW/m² 增加到 550kW/m²,壁温从 500℃ 增加到 620℃。Fu等^[18]在吸气式高超声速飞行器再生冷却剂工作参数范围内研究了不同管径通道内航空煤油 RP-3 的超临界压力传热特性,并拟合了传热关联式。

本文以吸气式高超声速飞行器再生冷却为背景,在工程应用参数范围内,以不锈钢圆管为试验件,采用电加热方式模拟冷却通道热环境,试验研究了航空煤油 RP-3 在高热流密度条件下超(近)临界压力下的流动传热特性。本文研究与已有研究存在几点区别:(1)已有研究的拟沸腾现象多针对化合物,而本文研究的航空煤油 RP-3 是混合物;(2)本文研究的拟沸腾发生在热流密度较高的条件下,拟沸腾发生时流体温度低于拟临界温度,壁面温度高于拟临界温度,类似于亚临界的过冷沸腾,故称之为拟过冷沸腾。研究发现航空煤油 RP-3 在流体温度低于拟临界温度的超(近)临界压力下发生了拟过冷沸腾传热现象,并获得了 RP-3 的拟过冷沸腾区别于亚

临界压力过冷沸腾和其它碳氢燃料在超临界压力下的传热特性。

2 实验装置与测量方法

实验在动力工程多相流国家重点实验室吸热型碳氢燃料流动换热小型试验台上完成。图1为试验系统简图。系统的主要参数指标如下:质量流量0~10g/s;压力为常压~10MPa;加热功率0~28kW;流体温度20~800℃;外壁面温度不高于1000℃。实验系统的详细介绍和数据处理方法见参考文献[7, 19, 21]。

试验段为水平放置、均匀受热的小圆管,管道尺寸为 $\Phi 3 \times 0.7$ mm,长300mm,加热长度240mm。管道材料为世伟洛克316不锈钢。沿试验段轴向均匀布置10个测温截面,间距为25mm,每个截面点焊上下两个K型测温热电偶。试验段进出口布置流体温度测量点和压力测点。采用世伟洛克管接头连接试验段进行耐压耐温密封。试验段前安装预热段,以改变试验段燃料的进口温度。试验段外表面加装保温棉,以减小散热损失,并保证壁温测量的稳定性。

测量参数包括质量流量、压力、工质温度、试验段外壁面温度、加热电流和加热电压。工质流量由科里奥利力质量流量计测量,精度0.05%。采用Rosemount 3051压力表测量试验段的压力。压力变送器精度0.075%。采用 $\Phi 1.5$ mm的K型铠装热电偶测量工质温度。管外壁温采用 $\Phi 0.2$ mm的K型热电偶丝点焊壁面进行测量。加热电压和电流采用真有效值电压变送器和电流互感器、真有效值电流变送器测量,精确度0.2%。数据采集系统由工控机和IMP3595-1C数据采集系统构成。

试验前测量得到传热试验段的热损失和传热工质的热沉-温度计算关系式。试验数据处理时,根据传热试验段的热损失和加热功率,采用热平衡计算

得到传热试验段的内表面热流密度。根据传热工质的热沉-温度关系式和加热功率,采用热平衡法计算得到传热管内沿轴向主流流体温度。采用有源导热法,根据外壁温计算得到内壁温。最后,根据牛顿冷却公式计算得到管内沿轴向壁温测量截面处的传热系数分布。

3 结果与讨论

航空煤油RP-3在超(近)临界压力下的拟沸腾流动换热特性研究,开展了以下两类试验:(1)变热流试验:即压力、流量和燃料入口温度恒定,改变试验段热流密度;热流密度0.1~1.0MW/m²,流体温度为常温~350℃。(2)恒热流试验:即压力、流量和试验段热流密度恒定,改变试验段入口温度;热流密度1.0MW/m²,流体温度为常温~650℃。

3.1 传热特性沿轴向的变化趋势

如图2所示,为热流密度逐渐增加,燃料的传热特性沿轴向的变化趋势,横坐标为沿轴向流体在试验管内的主流温度,纵坐标为内壁温和传热系数。总体上,随着热流密度增加,内壁温和传热系数都呈现增加的趋势。

根据热流密度 q 的大小,内壁温和传热系数的变化趋势可以分成三个区域:(1)低热流密度区域 $100\text{kW/m}^2 < q < 300\text{kW/m}^2$,随着热流密度增加,内壁温显著增加,换热系数几乎不变;(2)中热流密度区域 $400\text{kW/m}^2 < q < 700\text{kW/m}^2$,除第一个测温点外,其余内壁温维持在350℃~450℃,不随热流密度发生显著变化,即热流密度对内壁温不产生影响,但换热系数显著增加;(3)高热流密度 $800\text{kW/m}^2 < q < 1000\text{kW/m}^2$,随热流密度增加,试验段入口部分的内壁温有所降低,换热系数的增加幅度逐渐减小;试验段靠近出口处的内壁温增加,超过450℃,换热系数重叠在一起,甚至开始减小。

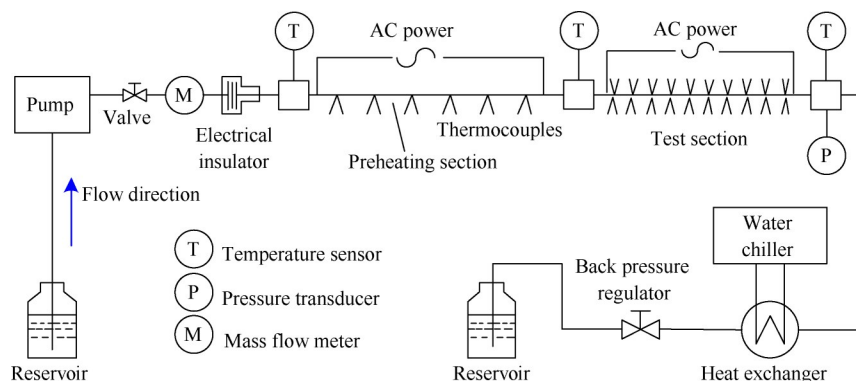


Fig. 1 Schematic diagram of the endothermic fuel test rig in Xi'an Jiaotong University (XJTU)

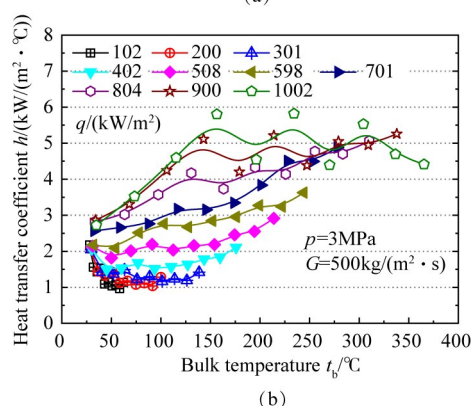
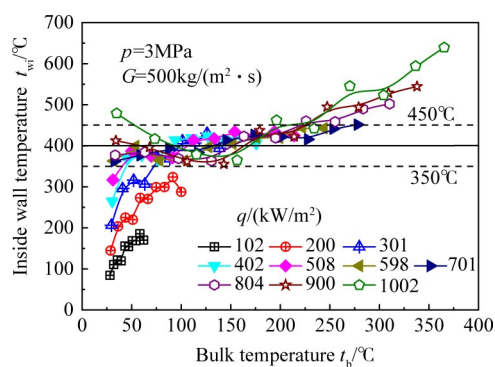


Fig. 2 Heat transfer characteristics along the axial direction of the test tube

3.2 热流密度对传热特性的影响

如图3所示,为沿轴向布置的所有热电偶(TC1~TC10)处,内壁温和传热系数随热流密度变化趋势。

低热流密度区域,内壁温随热流密度增加线性增加到\$(350\sim 450)^{\circ}\text{C}\$温度区间。在热流密度\$402\text{kW}/\text{m}^2\$条件下,除第一个热电偶外,其余热电偶处的壁面温度都超过了\$350^{\circ}\text{C}\$。热流密度在\$0\sim 300\text{kW}/\text{m}^2\$,热流密度增加,传热系数变化较小。

中热流密度区域,热流密度继续增加,内壁温维持在\$(350\sim 450)^{\circ}\text{C}\$区间,单个热电偶处的壁面温度基本不随热流密度的增加而变化。在该热流密度区间内,壁面温度受到流体温度的影响,大于热流密度的影响。对比图2和图3内壁温的变化趋势可以发现:流体温度升高(沿着轴向流体流动方向),壁温有缓慢升高的趋势,从\$350^{\circ}\text{C}\$升高到\$450^{\circ}\text{C}\$;而热流密度增加,在中热流密度区域,对壁温无显著影响,如TC4所示。该区域内,热流密度增加,传热系数迅速增加。

高热流密度区域,试验段靠近出口部分(TC7~TC10)的内壁温开始脱离\$(350\sim 450)^{\circ}\text{C}\$温度区间,继续缓慢上升。同时,该位置处的传热系数不再沿着中热流密度区域的变化趋势继续增加。而此时

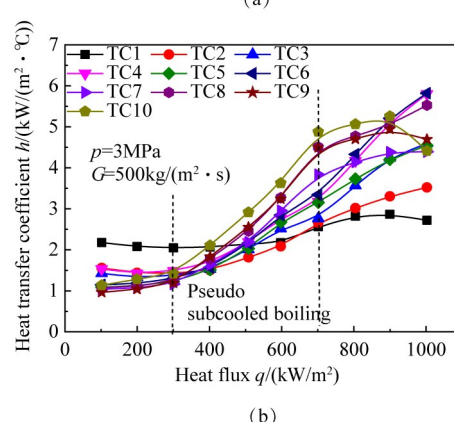
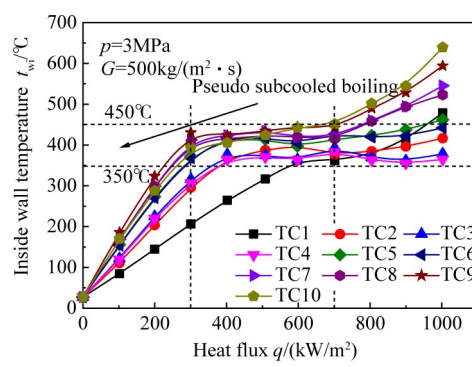


Fig. 3 Heat flux effects on the heat transfer characteristics

流体温度只有\$300^{\circ}\text{C}\$左右,低于拟临界温度,仍处于过冷沸腾状态。因此,此处发生了拟过冷沸腾传热恶化。热流密度在\$700\sim 1000\text{kW}/\text{m}^2\$内,管内壁温为\$450\sim 650^{\circ}\text{C}\$。随着热流密度增加,换热系数从增加逐渐过渡到减小,发生传热恶化。

雷诺数计算结果显示:质量流速\$500\text{kg}/\text{m}^2\text{s}\$条件下,热流密度\$0.1\sim 1.0\text{MW}/\text{m}^2\$,入口常温,出口流体按主流温度约\$350^{\circ}\text{C}\$,计算得到的雷诺数约为\$500\sim 13000\$。低热流密度区域管内流体雷诺数为\$500\sim 2100\$,处于层流状态,是层流超临界压力下单相液态强制对流换热。中热流密度区域雷诺数为\$2800\sim 6200\$,处于层流转化成湍流的过渡区。中热流密度区域壁面与主流的传热温差呈现下降趋势,管道近壁面附近发生拟沸腾。管内壁温恒定,管内主流温度上升,传热温差减小,同时热流密度增加,故换热系数快速增加。该换热过程中,不仅包含超临界压力下流体的对流换热过程,同时因管内壁温已达到拟临界温度,所以传热过程还应包含超临界压力下流体的拟过冷沸腾过程。

3.3 拟过冷沸腾与过冷沸腾的壁温特性对比

中热流密度区域发生的内壁温基本不受热流密度影响的现象,与Liu等^[19]报道的碳氢燃料亚临界过冷沸腾现象相似。该区域内流体温度不超过\$250^{\circ}\text{C}\$,

壁面温度接近或大于航空煤油 RP-3 的临界温度 652K(379℃),可以判断该区域内发生了超临界压力下的拟过冷沸腾。该传热区域内的拟过冷沸腾具有如下传热特征:(1)内壁温几乎不受热流密度的影响;(2)内壁温随流体温度升高而缓慢升高;(3)传热系数随热流密度增加而线性增加。

本文的拟过冷沸腾与文献中亚临界过冷沸腾现象的不同点:(1)沸腾壁温变化趋势不一样;Liu 等^[19]的研究结果中,过冷沸腾内壁温沿着轴向基本不变,且不随热流密度的变化而改变,而本文的拟沸腾内壁温沿着轴向有缓慢增加的趋势;这导致了拟过冷沸腾内壁温存在一个沸腾温度区间(350~450)℃,而过冷沸腾壁温几乎恒定,如图 4(a)所示。(2)传热恶化过程不一样;过冷沸腾易发生壁温飞升,而拟过冷沸腾传热恶化有一个缓慢地恶化过程,而不是突然发生,如图 4(b)所示。

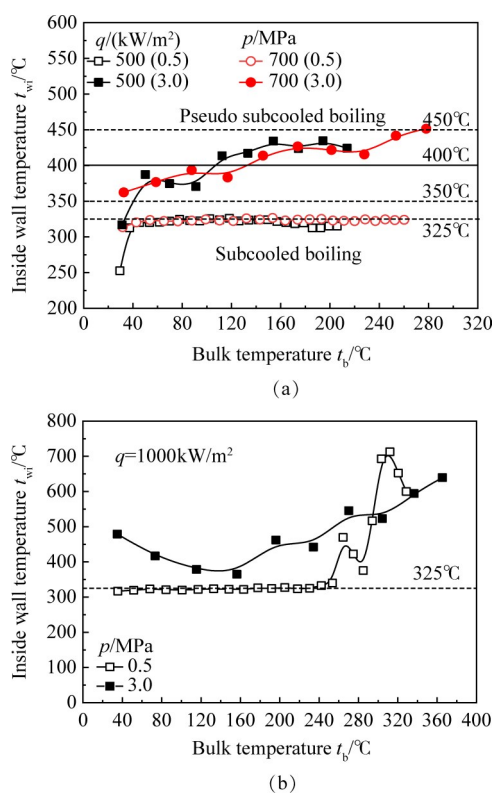


Fig. 4 Comparison of heat transfer characteristics between the pseudo subcooled boiling in this study and the subcooled boiling by Liu^[19]

根据超临界拟沸腾的最新研究成果^[8-13],拟沸腾过程中,超临界流体从类液态向类气态转换,是一个伴随着温度上升逐渐气化的过程。而众所周知,亚临界压力下,化合物的沸腾过程中流体温度不变。本文研究获得的拟沸腾过程中壁温缓慢增加的特性,与超临界流体类液态向类气态转化流体温度升

高的特性相吻合。

综上所述,拟过冷沸腾传热在整个过冷沸腾传热区间内具有更加平稳的传热特征,内壁温变化更加平缓。

3.4 湍流与拟过冷沸腾换热的相互影响

如图 5 所示,质量流速增加到 $720\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $1000\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,航空煤油在小通道内的内壁温经历了上文相似的变化趋势:壁温先随热流密度增加,而后到一定温度值后维持基本不变。但随着质量流速的增加,拟沸腾壁温值与拟沸腾初始热流密度值发生了变化。质量流速增加到 $720\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,拟沸腾壁温增加到(400~500)℃温度区间,发生拟沸腾的初始热流密度增加到 $600\text{ kW}/\text{m}^2$,而质量流速 $500\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时对应的拟沸腾初始热流密度只有约 $300\text{ kW}/\text{m}^2$ 。如图 5(b)所示,质量流速增加到 $1000\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,在热流密度小于 $1000\text{ kW}/\text{m}^2$ 的条件下,湍流强化换热,使内壁温低于 400°C ,抑制了过冷沸腾的发生,拟沸腾区域不再存在。

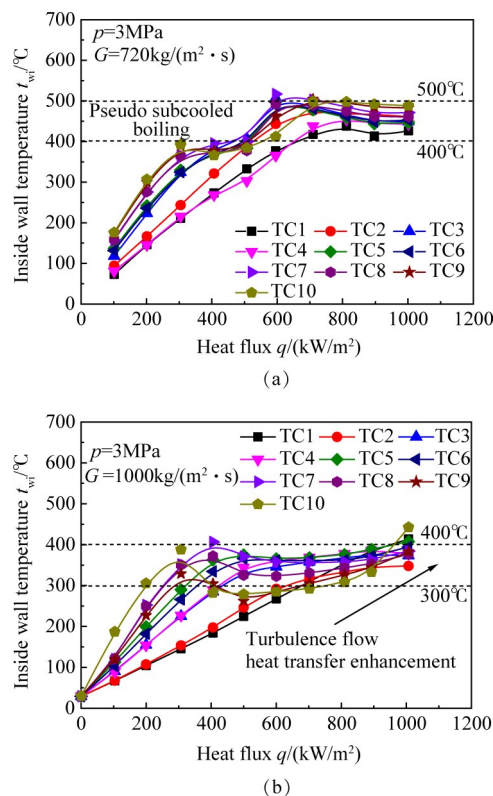


Fig. 5 Mass flux effects on heat transfer characteristics

这是因为随着质量流速增加,航空煤油首先从层流向湍流转变,湍流加强了换热,抑制了过冷沸腾的发生,从而使过冷沸腾的壁温增加,同时过冷沸腾所需的初始热流密度增加。根据雷诺数计算结果,如图 5 所示质量流速 $720\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 条件下热流密度

300~400kW/m²,以及质量流速 1000kg/(m²·s)条件下热流密度 400~500kW/m²试验段出口流体雷诺数大于 2300,从层流向湍流过渡转化。

3.5 恒热流密度条件下的拟沸腾传热特性

试验段热流恒定,通过改变预热段的热流,改变试验段的入口温度。图6为恒定热流密度 1000kW/m²,燃料入口温度从常温升高到 396℃时,试验段内燃料的传热性能趋势图。在试验工况下,由于管子长度较短,在入口燃料温度为常温的条件下,燃料的出口温度小于 400℃。通过提升入口燃料温度,燃料的出口温度最高达到了 650℃以上。

从图5可以看出,热流密度达到 1000kW/m²,即使入口燃料温度为常温,壁温也达到(400~500)℃区间,发生拟沸腾。内壁温随着燃料温度升高有逐渐升高的趋势。燃料温度约 380℃(拟临界温度点附近),内壁温有一个峰值,正是在此峰值处,是燃料传热系数的一个转折点(极小值点)。燃料温度低于 380℃,传热系数随燃料温度升高而缓慢增加;燃料温度大于 380℃,换热系数增速加快。如图6所示,随着燃料温度升高,试验段内燃料经历了拟沸腾传热强化,拟临界点附近的沸腾传热弱化,和拟临界温度点后的传热强化过程。

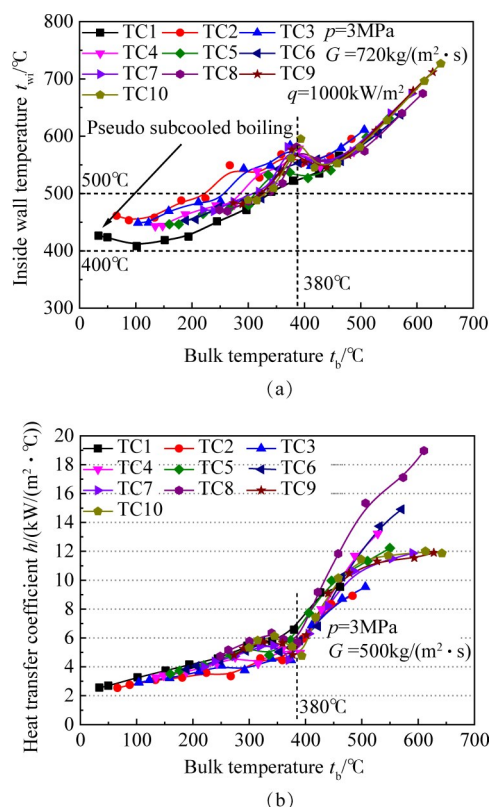


Fig. 6 Heat transfer characteristics at a constant heat flux of 1000kW/m²

4 结 论

研究得到以下结论:

(1)超(近)临界航空煤油 RP-3 在壁温达到拟临界温度后,会发生拟过冷沸腾传热现象,拟沸腾的起始温度和沸腾壁温受到热流密度和质量流速的影响,其本质是拟沸腾与湍流的相互作用。

(2)超临界 RP-3 传热区域可划分为类液态强制对流传热区、拟过冷沸腾传热区和类气态强制对流传热区。

(3)在拟过冷沸腾区域,随着流体温度升高和热流密度增加,沸腾传热系数增加;拟临界温度区域会发生传热弱化;燃料温度大于拟临界温度,燃料处于超临界类气态,发生传热强化,且换热系数大幅增加。

本文采用不锈钢作为试验段,未能对拟沸腾传热拍摄直观图像。下一步研究工作计划研制高温可视化装置和技术,开展碳氢燃料拟沸腾可视化相关研究。

致 谢:感谢国家自然科学基金的资助。

参考文献

- [1] 章思龙, 秦江, 周伟星, 等. 高超声速推进再生冷却研究综述[J]. 推进技术, 2018, 39(10): 2177-2190. (ZHANG Si-long, QIN Jiang, ZHOU Wei-xing, et al. Review on Regenerative Cooling Technology of Hypersonic Propulsion[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(10): 2177-2190.)
- [2] Edwards T. Liquid Fuels and Propellants for Aerospace Propulsion: 1903-2003[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(6): 1089-1107.
- [3] 孙鑫, 杨成虎. 5kN再生冷却发动机推力室传热研究[J]. 火箭推进, 2012, 38(2): 32-37.
- [4] Urbano A, Nasuti F. On the Onset of Heat Transfer Deterioration in Supercritical Coolant Flow Channels[C]. *New Orleans: 43th AIAA Thermophysics Conference*, 2012.
- [5] 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.
- [6] 景婷婷, 何国强, 秦飞, 等. 超临界裂解煤的并联通道流量分配特性研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(1): 1-6.
- [7] Liu Z H, Zhang Z J, Zhao S J, et al. Heat Transfer of Supercritical Endothermic Fuel in 3-mm Diameter Channels: Comparison between Asymmetric and Uniform Heating[J]. *International Journal of Heat and Mass*

- Transfer*, 2019, 140(9): 371–378.
- [8] Simeoni G G, Bryk T, Gorelli F A, et al. The Widom Line as the Crossover between Liquid-Like and Gas-Like Behaviour in Supercritical Fluids[J]. *Nature Physics*, 2010, 6(7): 503–507.
- [9] Yoon T J, Ha M Y, Lee W B, et al. A Corresponding-State Framework for the Structural Transition of Supercritical Fluids across the Widom Delta[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2019, 150(15).
- [10] Ha M Y, Yoon T J, Thusty T, et al. Widom Delta of Supercritical Gas-Liquid Coexistence[J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2018, 9(7): 1734–1738.
- [11] Banuti D T. Crossing the Widom-Line-Supercritical Pseudo-Boiling[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2015, 98: 12–16.
- [12] Maxim F, Contescu C, Boillat P, et al. Visualization of Supercritical Water Pseudo-Boiling at Widom Line Cross-over[J]. *Nature Communication*, 2019, 10(1): 1–11.
- [13] Kim K, Hickey J P, Scalo C. Pseudophase Change Effects in Turbulent Channel Flow under Transcritical Temperature Conditions [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 871: 52–91.
- [14] Zhong F Q, Fan X J, Yu G. Heat Transfer of Aviation Kerosene at Supercritical Conditions[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2009, 23(3): 543–550.
- [15] Wang N, Zhou J, Pan Y, et al. Experimental Investigation on Flow Patterns of RP-3 Kerosene under Subcritical and Supercritical Pressures [J]. *Acta Astronautica*, 2014, 94(2): 834–842.
- [16] Zhang C B, Xu G Q, Gao L, et al. Experimental Investigation on Heat Transfer of a Specific Fuel (RP-3) Flows through Downward Tubes at Supercritical Pressure [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2012, 72(9): 90–99.
- [17] Jiao S, Li S F, Pu H, et al. Experimental Investigation on Thermal Cracking and Convective Heat Transfer Characteristics of Aviation Kerosene RP-3 in a Vertical Tube under Supercritical Pressures [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 146(10).
- [18] Fu Y C, Huang H R, Wen J, et al. Experimental Investigation on Convective Heat Transfer of Supercritical RP-3 in Vertical Miniature Tubes with Various Diameters [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 112: 814–824.
- [19] 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 1mm Diameter Channel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55: 4987–4995.
- [20] Jamialahmadi M, Muller-Steinhagen H, Abdollahi H, et al. Experimental and Theoretical Studies on Subcooled Flow Boiling of Pure liquids and Multicomponent Mixtures[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(9–10): 2482–2493.
- [21] 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(1–2): 1047–1054.

(编辑:梅 瑛)