

小通道内碳氢化合物极限热流密度实验研究

杨竹强¹, 金祺¹, 刘峰¹, 张巧玲², 高天泽³, 康桥¹, 苗瑞璞¹, 张博¹

(1. 大连理工大学能源与动力学院, 116024, 辽宁大连; 2. 西安理工大学水利水电学院, 710048, 西安;
3. 北京动力机械研究所, 100074, 北京)

摘要: 针对新一代发动机热防护所采用的再生主动冷却技术中的传热问题,对超临界压力下碳氢化合物的传热特性进行了实验研究。利用主流温度、内壁温度、传热系数等划分指标,量化了正常传热、传热强化、传热弱化3个阶段的区间划分;定义超临界压力下发生传热弱化时对应的热流密度为极限热流密度,对其影响因素进行研究,发现压力越高、质量流量越大、加热入口温度越低,极限热流密度越高;采用拟沸腾数对极限热流密度进行表征,并发现拟沸腾数与入口温度和压力相关,与雷诺数弱相关;基于实验数据,采用量纲分析方法得到综合影响因素下极限热流密度的预测公式,数据预测偏差在±10%以内。该研究结果可用于预测传热弱化现象的发生,为飞行器换热结构设计提供理论依据,进而保证飞行器整体的安全运行。

关键词: 超临界压力, 传热特性, 碳氢化合物, 极限热流密度

中图分类号: TK24 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202203007 **文章编号:** 0253-987X(2022)03-0065-10



OSID 码

An Experimental Study on Ultimate Heat Flux of Hydrocarbon in Mini-Channels

YANG Zhuqiang¹, JIN Zhen¹, LIU Feng¹, ZHANG Qiaoling², GAO Tianze³,

KANG Qiao¹, MIAO Ruipu¹, ZHANG Bo¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;
2. College of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
3. Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: Heat transfer characteristics of hydrocarbons under supercritical pressure are experimentally studied to solve the heat transfer problem of regenerative active cooling technology used in the thermal protection of a new generation engine. The bulk temperature, inner wall temperature and heat transfer coefficient are used as indicators to quantify the interval division of three stages: normal heat transfer, heat transfer enhancement, and heat transfer weakening. The heat flux corresponding to heat transfer weakening under supercritical pressure is defined as the ultimate heat flux (q_c), and its variation law is studied. It is found that the higher the pressure, or the greater the mass flow, or the lower the heating inlet temperature, the higher the ultimate heat flux. The pseudo-boiling number (SBo) is used to characterize q_c , and it is found that SBo is correlated with the inlet temperature and pressure, and is weakly correlated with the Reynolds number. Based on the experimental data, the dimensional analysis method is used to obtain a

prediction formula of q_c , and the data prediction deviation is within $\pm 10\%$. The research result can be used to predict the occurrence of heat transfer weakening.

Keywords: supercritical pressures; heat transfer characteristics; hydrocarbon; ultimate heat flux

超临界流体传热是指流体在超临界压力下从拟临界温度以下被加热到温度高于拟临界温度以上过程中的热量传输过程。从20世纪50年代开始,超临界水动力循环、超临界 CO_2 布雷顿循环、超临界水氧化技术以及超临界萃取、超临界微粒化等技术的迅速发展,吸引国内外学者开展了有关管内超临界流体传热性能的广泛研究。

由于流体在超临界压力各状态之间转换没有汽化潜热的吸放热过程,超临界压力流体传热常被视为变物性单相流体对流传热^[1-10],超临界压力流体的传热特性规律由拟临界温度区间热物性参数改变所主导。Swenson在圆管超临界水传热实验中发现,当管内流体位于大比热区(比定压热容 $C_p > 8 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)时将出现显著传热强化现象^[11]。Yamagata等证实了传热强化机制与拟临界区间比热峰值之间的相关性^[2]。陈听宽等研究了不同管型与工况条件下超临界水流动传热过程,总结了管内传热特性的影响因素,阐述了传热强化作用机理^[4]。Shitsman等分析了正常传热、传热强化与传热恶化等过程,提出以热流密度与质量流速比作为判别传热恶化的指标^[12]。李虹波等研究了超临界水在不同管道内的传热特性,指出当热流密度与质量流速比较大时,流体温度低于拟临界温度即发生传热恶化现象^[13]。在超临界 CO_2 传热研究过程中,Jackson团队揭示了浮升力与热加速对于传热过程的影响机理,指出热流密度与质量流速比存在影响壁温飞升的临界值^[9-10]。Kim等对比了超临界 CO_2 在竖直向上和向下流动中的传热特性,发现向上流动过程存在壁温“陡增”峰值,而向下流动时没有发生^[8]。姜培学团队开展了关于微小尺度下管内超临界 CO_2 的研究,同样观测到了 CO_2 传热异化现象的发生。

文献[14]中提出,在超临界流体传热过程的分析中,学者们对于传热特性强弱转换的评判方法可归纳为以下3种。

第1种根据壁面温度是否出现峰值判断。当管壁温出现飞升现象(即存在峰值),认定传热弱化;而当壁温单调递增时,弱化过程不存在。此判别方法是对传热弱化现象最直观的描述。

第2种基于传热系数对比值来判断。方贤德指

出当 $Nu/Nu_{\text{DB}} < 0.3$ 时,出现传热弱化,其中 Nu 数是根据实验结果计算得到, Nu_{DB} 是根据Dittus-Boelter公式计算所得的 Nu 数^[15];部分学者认为当 $h/h_0 < 1.0$ 时出现传热弱化,其中 h 是根据实验结果计算得到的传热系数, h_0 是根据Dittus-Boelter公式计算得到的参考点处的传热系数,参考点处的焓应远小于拟临界点处的焓。

第3种根据壁面温度是否超过温度上限来判断。该类型以壁温超过温度上限时识别传热弱化的发生,而温度上限则由加热管道材料和流动工质共同决定。

对于强弱转化伴随过程指标的量化分析,学者们提出了采用极限热流密度 q_c (超临界压力下传热弱化起始点处对应的热流密度 q)来表征传热规律的转折点,即传热弱化发生的起始点。Yamagata等对超临界水传热特性进行研究,拟合实验数据获得极限热流密度关联式为 $q_c = 0.2G^{1.2[2]}$, G 表示质量流量;Styrikovich获得的圆管内超临界水传热弱化发生的实验关联式为 $q_c = 0.58G^{[16]}$,同类型的极限热流密度与质量流速之间的线性关系被Yin和Mokry^[17-18]所证实。针对超临界压力下的二氧化碳,Kim等提出了预测极限热流密度的关系式为 $q_c = 0.00002G^{2[19]}$ 。Urbano通过数值模拟方法提出了有关超临界压力下甲烷和戊烷极限热流密度的预测关联式,将 q/G 拟合为压力比的函数形式^[20]。罗毓珊对于超临界压力下煤油的极限热流密度进行了研究,发现存在最佳工况压力所获得的极限热流密度最大,同时流体入口温度影响极限热流密度^[21];获得极限热流密度的计算式为 $q_c = 0.122G^{0.526}$ 。除热流密度与质量流速函数表达式之外,学者们也曾尝试引入流体密度、黏度、 Re 数、 Pr 数以及摩擦系数等因素,以获知传热弱化发生的温度条件^[22-24]。由上可知,前人提出的预测模型存在公式两端量纲不匹配和影响参数不统一的问题,导致关联式对于流体工质和工况条件局限性很强。开展超临界流体极限热流密度影响因素分析,获取适用性强、精度好的预测模型的研究工作显得很有必要。

本文以高超声速飞行器热防护中主动再生冷却技术为研究背景,以碳氢化合物为冷却工质,围绕其在典型小通道中传热特性展开实验研究。利用流体

温度、管壁温度、传热系数综合指标,完成传热过程正常传热、传热强化、传热弱化不同阶段的定义划分;剖析超临界压力下极限热流密度的影响因素,采用量纲分析和多元线性回归方法得到极限热流密度预测公式。研究结果可以为飞行器换热结构设计提供理论依据,进而保证飞行器整体的安全运行。

1 实验系统及数据处理

1.1 实验系统

本实验所采用的超临界流体传热测试系统如图 1 所示,由储液罐、高压恒流泵、体积流量计、交流电加热系统、温度传感器、压力(差)传感器、冷凝器、背压阀和信号采集系统组成。

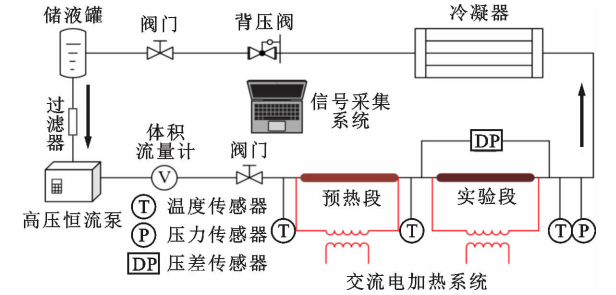


图 1 超临界流体传热测试系统

Fig.1 Schematic diagram of supercritical fluid heat transfer test system

测试工质经过恒流泵增压后,在预热盘管内被加热到预设流体温度,流经实验管路(316 不锈钢, $\Phi 3\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$,管长 670 mm)完成换热测试后,最终经过冷凝器冷却流回储液罐进行下一次循环。工质流量由放置于预热盘管前的体积流量计(CX-M5-SS,0~500 mL/min,不确定度为 0.5%)测量;工质流体温度由布置在实验管路进出口位置处的 K 型铠装热电偶(Omega,0~590℃,不确定度为 0.4%)测量;实验管壁温度采用焊接在管壁表面的热电偶丝进行测量,实验段热电偶分布如图 2 所示, $x_0=30\text{ mm}$, $x_1=70\text{ mm}$, $x_2=10\text{ mm}$ 。实验测量参数均由数据采集系统(Keithley 2700,不确定度为

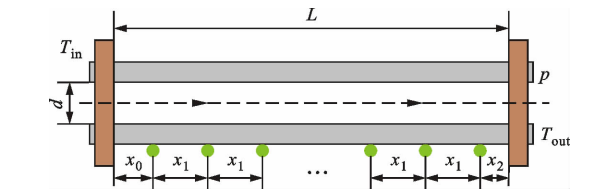


图 2 实验段热电偶分布

Fig.2 Thermocouple distribution in experimental section

1%)在稳态工况下进行采集。

1.2 实验流程与数据处理

选取碳氢化合物环己烷(质量分数为 99.5%)、正戊烷(质量分数为 99.0%)以及二者不同配比的混合物作为实验工质,工质临界参数由 NIST 数据库查得,实验工质临界参数见表 1,实验工况条件见表 2。

表 1 实验工质临界参数

Table 1 Critical parameters of experimental working fluids

工质	环己烷/正戊烷 的质量分数/%	临界压力 /MPa	临界温度 /℃
环己烷	100/0	4.05	280.40
混合物 1	70/30	3.90	252.59
混合物 2	50/50	3.75	235.15
混合物 3	30/70	3.60	218.45
正戊烷	0/100	3.37	196.60

表 2 实验工况条件

Table 2 Experimental conditions

参数	数值或范围
水平管内径/mm	2.0
系统压力 p /MPa	2.3~5.3
体积流量/(mL·min ⁻¹)	150~360
质量流量 m /(g·s ⁻¹)	1.84,2.47,3.10,3.73
热流密度 q /(kW·m ⁻²)	50~550

实验操作流程如下。

- 步骤 1 开启高压恒流泵并给定泵的流量,调节背压阀给定系统压力,调节预热功率使加热入口温度恒定。
- 步骤 2 调节加热功率达到给定热流密度。
- 步骤 3 待实验系统达到稳定,开始采集数据:体积流量、加热功率、实验管进出口流体温度、系统压力以及实验管壁温。每个采集时间为 90 s,实验数据由采集卡记录并储存在 Excel 表格里。
- 步骤 4 步进加热功率,重复步骤 3。
- 步骤 5 改变系统压力,重复上述步骤 1~4。
- 步骤 6 更换实验工质,重复上述步骤 1~5。

为确保实验过程中工质不发生裂解,控制流体出口温度和管壁温度分别在 320℃和 500℃以下。实验数据处理计算获得管路内壁温度、主流温度以及局部对流换热系数,具体计算方法见文献[25],表 3 为实验系统参数与计算参量的不确定度。

表 3 实验系统参数与计算参量的不确定度

Table 3 Uncertainties of experimental system parameters and calculated parameters

系统参数与计算参量	不确定度/%
流体温度/℃	0.76
加热功率/W	0.20
体积流量/(mL·min ⁻¹)	0.61
压力/MPa	0.11
热流密度/(kW·m ⁻²)	0.70
质量流量/(g·s ⁻¹)	1.91
内壁面温度/℃	0.76
传热系数/(kW·m ⁻² ·K ⁻¹)	3.56

2 实验结果与讨论

首先进行了测试系统的可靠性和重复性实验,以确保实验结果的准确性。选取以下对流传热公式进行实验系统可靠性验证。

考虑到加热长度对流体传热的影响^[26],Bishop 提出下式

$$Nu_b = 0.006\,9Re_b^{0.9}\overline{Pr}_b^{0.66}\left(\frac{\rho_w}{\rho_b}\right)^{0.43}\left(1+2.4\frac{D}{x}\right) \quad (1)$$

将摩擦系数的影响考虑到对流传热过程中^[27],Gnielinski 提出下式

$$Nu_b = \frac{(f/8)(Re_b - 1\,000)Pr_b}{1 + 12.7(f/8)^{0.5}(Pr_b^{2/3} - 1)} \quad (2)$$

考虑到物性沿管路径向变化对传热带来的影响^[28],Jackson 提出下式

$$Nu_b = 0.018\,3Re_b^{0.82}Pr_b^{0.5}\left(\frac{\rho_b}{\rho_w}\right)^{0.3}\left(\frac{\overline{C}_p}{C_{p_b}}\right)^{0.4} \quad (3)$$

选择环己烷在超临界压力 4.28 MPa 下类液态传热过程进行研究,图 3 给出了环己烷在 p 为 4.28 MPa、 m 为 3.10 g/s 工况下实验测试结果可靠性验证, T_f 为主流流体温度。通过对比实验所得传热系数与经典传热公式计算值,偏差在±15%以内,验证了实验台的可靠性。

对环己烷在超临界压力为 5.3 MPa、质量流量为 3.73 g/s 工况下实验测试进行重复性验证,结果如图 4 所示,实验结果重复性良好。综上所述,本实验台数据可靠并具有可重复性,可以用其进行后续传热实验研究。

2.1 流体传热过程分析

选取环己烷在压比 $p/p_{cr}=1.3$ 时的实验结果进行分析,其中 p_{cr} 为工质临界压力。图 5 给出了环

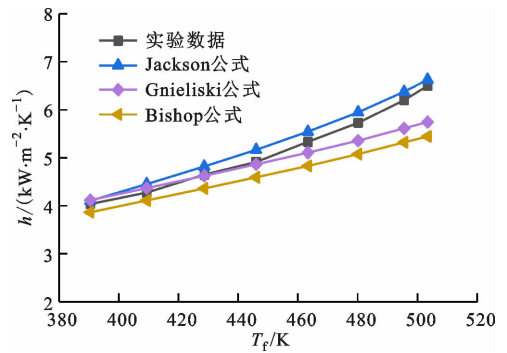


图 3 环己烷在 p 为 4.28 MPa、 m 为 3.10 g/s 工况下实验测试结果可靠性验证

Fig. 3 Reliability verification of experimental results of cyclohexane as $p=4.28$ MPa and $m=3.10$ g/s

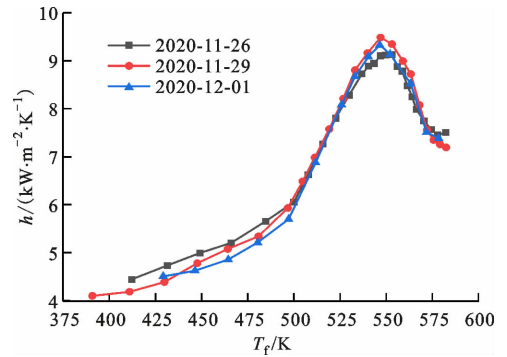
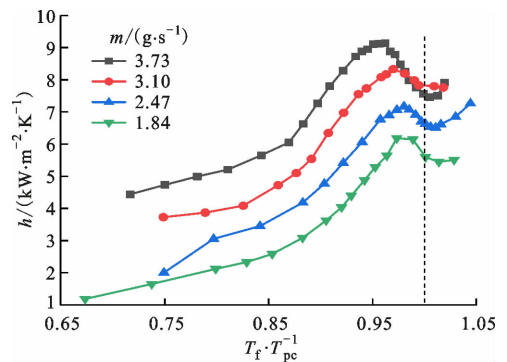


图 4 环己烷在 p 为 5.3 MPa、 m 为 3.73 g/s 工况下实验测试结果重复性验证

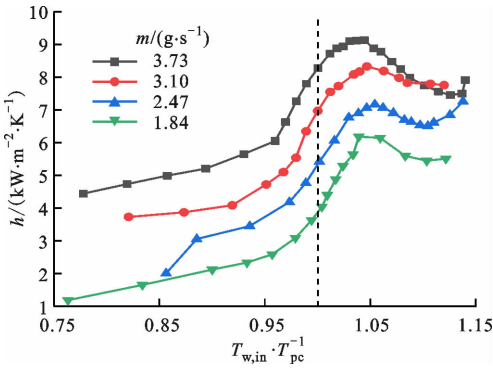
Fig. 4 Repeatability verification of experimental results of cyclohexane as $p=5.3$ MPa and $m=3.73$ g/s

己烷在超临界压力下传热系数随主流流体温度和内壁温度的变化,发现其表征传热特性的各项参数随换热过程发展存在一定的规律性,其中 $T_{w,in}$ 为内壁温度、 T_{pc} 为拟临界温度。

为了更为准确地表述,选取典型工况压力为 5.3 MPa、质量流量为 3.73 g/s 和流体入口温度 T_{in} 为 30℃ 时传热结果进行细致剖析,环己烷传热特性参数随流体温度和拟临界温度比的变化如图 6 所示。



(a)随流体温度和拟临界温度比的变化



(b) 随内壁温与拟临界温度比的变化

图 5 不同流量下环己烷在 $p/p_{cr}=1.3$ 、 $p=5.3$ MPa 时传热系数的变化

Fig.5 Heat transfer coefficient curves of cyclohexane as $p/p_{cr}=1.3$ and $p=5.3$ MPa

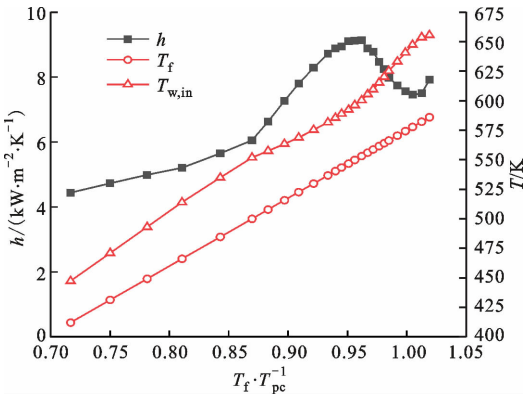


图 6 环己烷在 p/p_{cr} 为 1.3、 m 为 3.73 g/s、 T_{in} 为 30 °C 时传热特性随流体温度和拟临界温度比的变化

Fig.6 Heat transfer characteristic parameter curves of cyclohexane as $p/p_{cr}=1.3$, $m=3.73$ g/s, and $T_{in}=30$ °C

按照 $T_{w,in}$ 、 T_f 以及 T_{pc} 的大小关系将超临界流体传热过程进行区间划分,大致分为正常传热、传热强化、传热弱化 3 个阶段。

结合图 5 和图 6 中数据结果分析可得,当 $T_f < T_{w,in} < 0.95T_{pc}$ 时,内壁温度和传热系数均稳定增长, Nu/Nu_{DB} 在 1.0 附近波动;此时主流温度和内壁温度都低于拟临界温度,流体远离大比热区间,传热系数平稳增加,为正常传热阶段。

当 $T_{w,in} > 0.95T_{pc}$ 且 $T_f < 0.98T_{pc}$ 时,内壁温曲线斜率减小,传热系数相较正常传热阶段出现突然增加,此时发生了明显的传热强化,为传热强化阶段。此阶段内壁温接近并达到了实验压力下对应的拟临界温度,近壁面流体物性急剧变化,诱使流体微团之间掺混增强,传热能力显著提高。部分学者认为超临界压力下此过程类似于亚临界压力下的过

冷沸腾引发的传热强化,并验证了拟沸腾现象的存在^[29-31]。

当 $T_f > 0.98T_{pc}$ 且 $T_{w,in} > T_{pc}$ 时,内壁温度出现明显升高,传热系数较之前阶段逐渐降低,为传热弱化阶段。处于该阶段时,内壁温明显高于拟临界温度,近壁流体远离大比热区间,而主流流体温度处于物性急剧变化的拟临界区间。内壁面处发生类膜态沸腾,流体热容和传导能力均大幅下降,导致传热弱化。

在小质量流量工况下,当 $T_f > T_{pc}$ 且 $T_{w,in} > 1.1T_{pc}$ 时,相较传热弱化阶段传热系数再次上升,这是由于温度过高导致碳氢化合物发生裂解反应使其吸热增强。

2.2 极限热流密度的影响因素

不同工质在 p/p_{cr} 为 1.3、 m 为 3.73 g/s、 T_{in} 为 30 °C 时传热系数随热流密度的变化如图 7 所示,传热系数极值附近(传热弱化起始处)对应的热流密度即为对应工况下的极限热流密度,不同工况下极限热流密度呈现规律性分布。

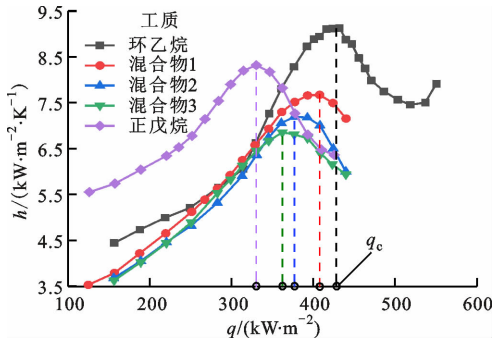


图 7 不同工质在 p/p_{cr} 为 1.3、 m 为 3.73 g/s、 T_{in} 为 30 °C 时传热系数随热流密度的变化

Fig.7 Variation of heat transfer coefficient of different working miduim with heat flux density of cyclohexane as $p/p_{cr}=1.3$, $m=3.73$ g/s, and $T_{in}=30$ °C

2.2.1 压比的影响

图 8 为固定质量流量和入口流体温度,压比 p/p_{cr} 分别为 1.05 和 1.3 条件下传热系数随热流密度的变化情况。不同压力下传热规律比较相似,在 T_f/T_{pc} 较小时流体温度远离拟临界温度,传热系数相差很小; T_f/T_{pc} 在 1.0 附近的时候,传热系数出现明显差别,压比为 1.05 条件下的传热系数高于压比为 1.3。表明流体热物性是影响传热过程的重要因素之一,而提高压力不利于拟临界区附近流体的传热,然而极限热流密度 q_c 随压力的提高而增加。这是由于在相同质量流量与流体入口温度下,压比为

1.3 工况下传热弱化起始点处焓与加热入口焓之差要大于压比为 1.05 工况下的,所以压力越高极限热流密度越大。

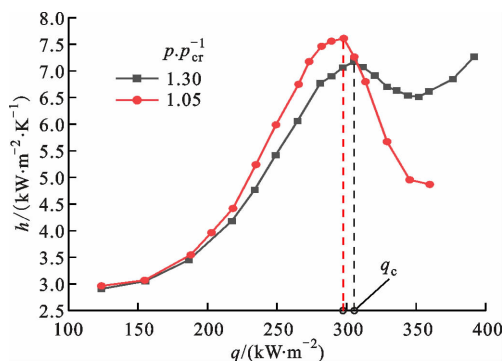


图 8 不同压比时环己烷在 m 为 3.73 g/s、 T_{in} 为 30 °C 工况下传热系数随热流密度的变化

Fig. 8 Variation of heat transfer coefficient with heat flux at different pressure ratios of cyclohexane as $m = 3.73$ g/s and $T_{in} = 30$ °C

2.2.2 质量流量的影响

不同质量流量时环己烷在 $p/p_{cr} = 1.3$ 、 $T_{in} = 30$ °C 工况下传热系数随热流密度的变化如图 9 所示,流体传热系数和 q_c 随着质量流量的增加均呈现增长的趋势。在相同的主流温度下,质量流量的提升导致强制对流过程中惯性力作用增强,流体微团之间的湍流掺混程度增加,有利于增强传热。

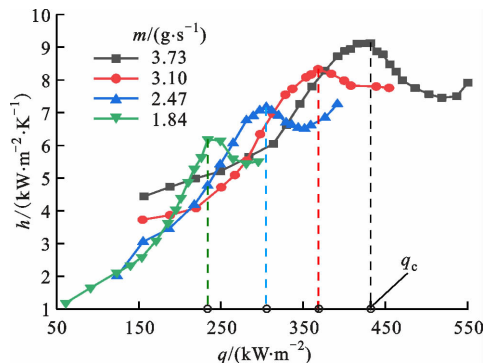


图 9 不同质量流量时环己烷在 $p/p_{cr} = 1.3$ 、 $T_{in} = 30$ °C 工况下传热系数随热流密度的变化

Fig. 9 Variation of heat transfer coefficient with heat flux density at different mass flow rate of cyclohexane as $p/p_{cr} = 1.3$ and $T_{in} = 30$ °C

各工况点 q_c 随质量通量的变化如图 10 所示,发现二者呈现良好的线性关系。进一步证实了 q_c 随压比的增加而增加,同时发现混合工质 q_c 位于纯组分之间,与组分配比正相关(即环己烷质量分数越大,极限热流密度越大)。

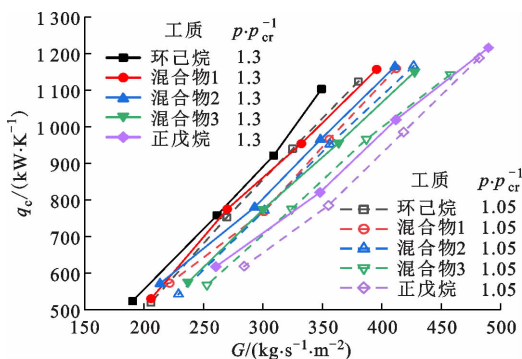


图 10 $T_{in} = 30$ °C 时不同压比下不同工质 q_c 随质量通量的变化

Fig. 10 Variation trend of q_c of different working medium with mass flux under different pressure ratio as $T_{in} = 30$ °C

2.2.3 流体入口温度的影响

不同流体入口温度时传热系数随热流密度的变化如图 11 所示,流体传热系数随流体入口温度的升高整体增加,而 q_c 呈现显著降低趋势。在相同质量流量下,流体温度的升高导致流体黏度降低, Re 增加,流体传热增强。

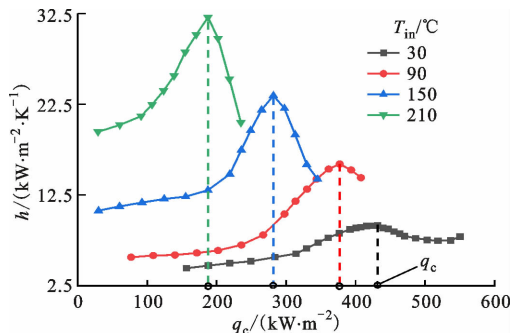


图 11 不同流体入口温度时环己烷在 $p/p_{cr} = 1.3$ 、 $m = 3.73$ g/s 工况下传热系数随热流密度的变化

Fig. 11 Variation of heat transfer coefficient with heat flux density at different fluid inlet temperature of cyclohexane as $p/p_{cr} = 1.3$ and $m = 3.73$ g/s

图 12 给出了 m 为 3.73 g/s 时不同压比下不同工质 q_c 随流体入口温度的变化。流体入口温度为 30 °C 时传热弱化起始点焓与入口焓差值为 640.05 kJ·kg⁻¹; 90 °C、150 °C、210 °C 分别对应的焓差为 506.70 kJ·kg⁻¹、368.21 kJ·kg⁻¹ 和 226.95 kJ·kg⁻¹。由此看出,入口温度越低,加热到传热弱化起始点所需的加热功率越大,极限热流密度越大。

2.3 与已有极限热流密度预测关联式对比分析

将获得实验结果与学者们提出的预测极限热流密度的关系式进行对比分析,各极限热流密度预测

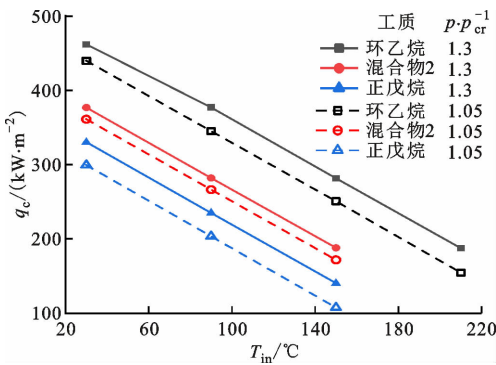


图 12 m 为 3.73 g/s 时不同压比下不同工质 q_c 随流体入口温度的变化

Fig. 12 Variation of q_c of different working medium with inlet temperature as $m=3.73$ g/s

关系式及适用实验工质如表 4 所示。

表 4 极限热流密度预测关系式及适用实验工质

预测公式	关联式	工质
Styrikovich ^[16]	$q_c=0.58G$	水
Ogata ^[32]	$q_c=0.034\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5}\frac{C_{p,pc}}{\beta_{pc}}G$	氮
程旭 ^[33]	$q_c=0.001354\frac{C_{p,pc}}{\beta_{pc}}G$	水
Petuhkov ^[24]	$q_c=0.187f\frac{C_{p,pc}}{\beta_{pc}}G$	CO ₂

图 13 为 q_c 实验结果与预测公式计算结果的对比。可以看出,即使对于实验结果预测相对较好的 Ogata 关联式,也仅有 52% 的数据点落在 $\pm 20\%$ 的误差带内,而其他 4 个公式的预测结果偏差均很大。

Styrikovich 关联式只考虑了质量流量对极限热流密度的影响,而且公式两端量纲不相同,不具备普适性;其他 3 种关联式两端量纲相同,在质量流量影响的基础上加入了摩擦系数、比热容和体积膨胀系数对极限热流密度的影响,尝试通过拟临界点的比热容与体积膨胀系数的比值来体现压力的影响,但同样预测精度不高,且未考虑到加热入口温度对极限热流密度的影响。

2.4 构建极限热流密度无量纲预测关联式

由上文可知,需要综合考虑压力、流体入口温度、质量流量和工质物性因素对极限热流密度的影响,构建可准确预测极限热流密度的无量纲公式。选用不同无量纲参数来表征系统参数对传热特性曲线上传热弱化起始点的影响,然后使用量纲分析方

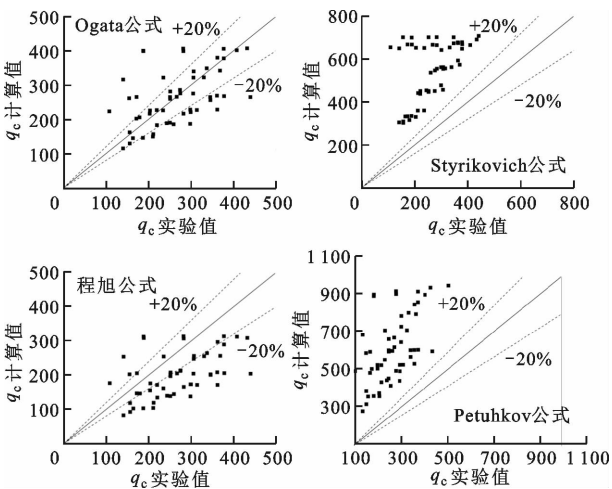


图 13 q_c 实验值与预测公式计算值的对比

Fig. 13 A comparison of q_c values between experiment and prediction

法得到可用来预测极限热流密度的无量纲公式;最终采用多元线性回归的方法获得相应系数。

根据上文提出的影响因素进行量纲分析,预测传热弱化起始点处极限热流密度的公式可表示为

$$F(q,G,d,H_{pc},\Delta H,p,p_{cr},u,\rho,\mu)=0 \tag{4}$$

式中: d 表示管内径; H_{pc} 表示工质拟临界温度处对应的焓,由于 NIST 数据库中焓有负值,因此本文选取室温 20℃ 对应的焓为 0 基准点; ΔH 表示拟临界温度处和加热入口温度处的焓之差; u 表示流速; ρ 表示流体密度; μ 表示动力黏度。

根据 π 定理,选择 d 、 u 和 ρ 作为基本参量,分析得到以下 6 个无量纲数

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= \frac{q}{\rho u^2 d^2} \\ \pi_2 &= \frac{H_{pc}}{u d^2} \\ \pi_3 &= \frac{\Delta H}{u d^2} \\ \pi_4 &= \frac{G}{\rho u} \\ \pi_5 &= \frac{\mu}{\rho u d} \\ \pi_6 &= \frac{p}{p_{cr}} \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

对以上参数化简,可得

$$\frac{\pi_1}{\pi_2 \pi_4} = \frac{q}{G H_{pc}} \tag{6}$$

$$\frac{1}{\pi_5} = Re \tag{7}$$

$$\frac{\pi_3}{\pi_2} = \frac{\Delta H}{H_{pc}} \tag{8}$$

$$\pi_6 = \frac{p}{p_{cr}} \quad (9)$$

其中无量纲数(q/GH_{pc})可以与亚临界压力下无量纲沸腾数($Bo = q/G\gamma$)类比,定义为超临界拟沸腾数,用 SBo 数^[29]来表示,因此,预测传热弱化起始点处极限热流密度的公式为

$$\frac{q}{GH_{pc}} = f\left(Re, \frac{\Delta H}{H_{pc}}, \frac{p}{p_{cr}}\right) = SBo \quad (10)$$

图14为 Re 对 SBo 数的影响,由图14可以看出,在流体入口温度相同的条件下, SBo 数几乎不随 Re 数的变化而变化;在 Re 数相近而流体入口温度不同的情况下, SBo 数随入口温度的增加而降低。由此看出 Re 对 SBo 数的影响相较流体入口温度对 SBo 数的影响不显著。

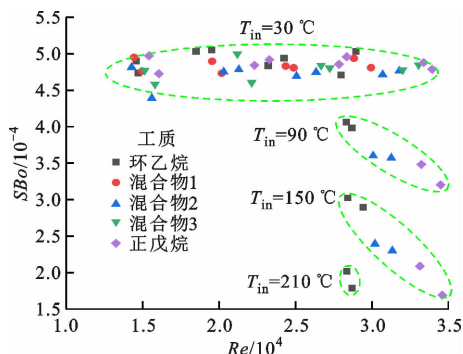


图14 Re 对 SBo 数的影响

Fig. 14 Influence of Reynolds on SBo number

无量纲数 $\Delta H/H_{pc}$ 表征了流体入口温度对极限热流密度的影响,图15给出了 $\Delta H/H_{pc}$ 对 SBo 数的影响,可以看出 $\Delta H/H_{pc}$ 对 SBo 数的影响非常显著, SBo 数随 $\Delta H/H_{pc}$ 的增加呈近似线性增长。

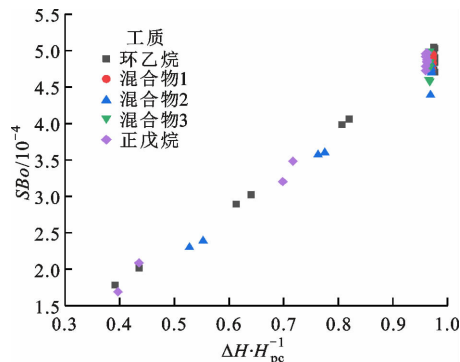


图15 $\Delta H/H_{pc}$ 对 SBo 数的影响

Fig. 15 Influence of $\Delta H/H_{pc}$ on SBo number

图16给出了无量纲数 p/p_{cr} 对 SBo 数的影响,由图16可以看出, p/p_{cr} 对 SBo 数的影响不可忽略, SBo 数随 p/p_{cr} 的增加而缓慢增加。

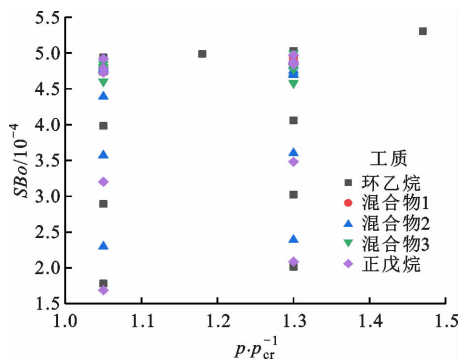


图16 p/p_{cr} 对 SBo 数的影响

Fig. 16 Influence of p/p_{cr} on SBo number

综上所述,极限热流密度预测公式(10)可以简化为

$$\frac{q_c}{GH_{pc}} = a \left(\frac{\Delta H}{H_{pc}} \right)^b \left(\frac{p}{p_{cr}} \right)^c \quad (11)$$

式中 a 、 b 和 c 是常数。在方程两边取自然对数,得到一个多元线性回归方程

$$\ln\left(\frac{q_c}{GH_{pc}}\right) = \ln a + b \ln\left(\frac{\Delta H}{H_{pc}}\right) + c \ln\left(\frac{p}{p_{cr}}\right) \quad (12)$$

根据超临界压力下实验数据采用多元线性回归方法,得到本文极限热流密度 q_c 的公式为

$$\frac{q_c}{GH_{pc}} = 0.000495 \left(\frac{\Delta H}{H_{pc}} \right)^{1.13} \left(\frac{p}{p_{cr}} \right)^{0.05} \quad (13)$$

式(13)主要适用于 $1.05 < p/p_{cr} < 1.3$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{in} < T_{pc}$ 的情况。

图17给出了 q_c 无量纲公式计算值与本文实验结果及文献[34-36]数据的对比,其中本文综合考虑了压力、质量流量和流体物性、入口温度等因素对于极限热流密度 q_c 的影响,数据预测偏差均在 $\pm 10\%$ 以内;而文献数据源于常规尺寸管径实验,且忽略了入口温度对极限热流密度的影响,故其数据结果与本文预测公式结果存在较大偏差。

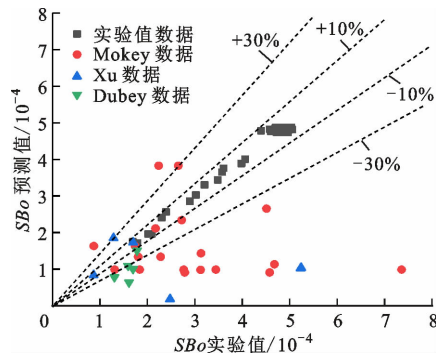


图17 SBo 数实验结果与预测公式的计算值比较

Fig. 17 Comparison of experimental results and predicted SBo values

3 结 论

本文以高超声速飞行器热防护中主动再生冷却技术为研究背景,对水平管路超临界压力下碳氢化合物的传热过程进行了实验研究。通过分析传热特性,得出了以下的结论。

(1)对于小通道中超临界流体水平流动,传热过程分为正常传热、传热强化、传热弱化不同阶段。

(2)表征超临界压力下传热弱化起始点的极限热流密度 q_c 与流体压比、入口温度和质量流量相关。

(3)无量纲拟沸腾数 SBo 受流体入口温度与压力影响明显,与 Re 弱相关。

(4)采用量纲分析和多元线性回归方法得到超临界压力流体极限热流密度公式,用于预测传热弱化特性的发生。

参考文献:

- [1] BOURKE P J, PULLING D J, GILL L E, et al. Forced convective heat transfer to turbulent CO_2 in the supercritical region [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1970, 13(8): 1339-1348.
- [2] YAMAGATA K, NISHIKAWA K, HASEGAWA S, et al. Forced convective heat transfer to supercritical water flowing in tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972, 15(12): 2575-2593.
- [3] DUFFEY R B, PIORO I L. Heat transfer and hydraulic resistance at supercritical pressures in power engineering applications [J]. Mechanical Engineering, 2007(1): 47.
- [4] 陈听宽, 孙丹, 罗毓珊, 等. 超临界锅炉内螺纹管传热特性的研究 [J]. 工程热物理学报, 2003, 24(3): 429-432.
CHEN Tingkuan, SUN Dan, LUO Yushan, et al. Investigation on the heat transfer characteristics of internally ribbed tube for supercritical pressure boiler [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(3): 429-432.
- [5] 王海军, 唐人虎, 罗毓珊, 等. 非均匀加热条件下超临界压力水在垂直管中的传热特性 [J]. 核动力工程, 2008, 29(4): 57-62.
WANG Haijun, TANG Renhu, LUO Yushan, et al. Heat transfer characteristic of supercritical pressure water in nonuniform heating vertical tube [J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(4): 57-62.
- [6] 吴刚, 毕勤成, 王汉, 等. 超临界压力水在倾斜上升管内传热的试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(5): 6-11.
WU Gang, BI Qincheng, WANG Han, et al. Heat transfer characteristics of supercritical water in inclined upward tube [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(5): 6-11.
- [7] WANG Haijun, HU Zhihong, GU Hongfang, et al. Heat transfer characteristic of water at near critical pressure in circumferentially non-uniformly heated vertical tubes [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 54: 167-175.
- [8] KIM D E, KIM M H. Experimental investigation of heat transfer in vertical upward and downward supercritical CO_2 flow in a circular tube [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2011, 32(1): 176-191.
- [9] JACKSON J D. Fluid flow and convective heat transfer to fluids at supercritical pressure [J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 264: 24-40.
- [10] JACKSON J D. Models of heat transfer to fluids at supercritical pressure with influences of buoyancy and acceleration [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 124: 1481-1491.
- [11] SWENSON H S, CARVER J R, KAKARALA C R. Heat transfer to supercritical water in smooth-bore tubes [J]. Journal of Heat Transfer, 1965, 87(4): 477-483.
- [12] SHITSMAN M E. The effect of natural convection on temperature conditions in horizontal tubes at supercritical pressures [J]. Thermal Engineering, 1966, 13(7): 69-75.
- [13] LI Hongbo, ZHAO Meng, HU Zhenxiao, et al. Experimental study of supercritical water heat transfer deteriorations in different channels [J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, 119: 240-256.
- [14] ZHANG Qian, LI Huixiong, LEI Xianliang, et al. Study on identification method of heat transfer deterioration of supercritical fluids in vertically heated tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127: 674-686.
- [15] LUO Zufen, FANG Xiande, YANG Yang, et al. Prediction of "critical heat flux" for supercritical water and CO_2 flowing upward in vertical heated tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 159: 120115.
- [16] STYRIKOVICH M A, MARGULOVA T K, MIROPOL'SKII Z L. Problem in the development of designs of supercritical boilers [J]. Teploenergetika, 1967, 14(6): 5-9.
- [17] YIN Fei, CHEN Tingkuan, LI Huixiong. An investi-

- gation on heat transfer to supercritical water in inclined upward smooth tubes [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2006, 27(9): 44-52.
- [18] MOKRY S, PIORO I, FARAH A, et al. Development of supercritical water heat-transfer correlation for vertical bare tubes [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(4): 1126-1136.
- [19] KIM J K, JEON H K, YOO J Y, et al. Experimental study on heat transfer characteristics of turbulent supercritical flow in vertical circular/non-circular tubes [EB/OL]. (2005-09-01) [2019-08-17]. http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00695547&language=ko_KR.
- [20] URBANO A, NASUTI F. Conditions for the occurrence of heat transfer deterioration in light hydrocarbons flows [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 65: 599-609.
- [21] 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.
- LUO Yushan, CHEN Tingkuan, HU Zhihong, et al. Investigation on heat transfer characteristics for kerosene under high parameter and in small diameter tube [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005, 26(4): 609-612.
- [22] PIORO I L, DUFFEY R B. Experimental heat transfer in supercritical water flowing inside channels (survey) [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2005, 235(22): 2407-2430.
- [23] PROTOPOPOV V, KURAEVA I, ANTONOV A. An approach to the determination of the conditions of occurrence of deteriorated heat transfer regimes at supercritical pressures [J]. *High Temperature*, 1974, 11(3): 529-532.
- [24] PETUKHOV B, PROTOPOPOV V, SILIN V. Experimental investigation of worsened heat-transfer conditions with the turbulent flow of carbon dioxide at supercritical pressure [J]. *High Temperature*, 1972, 10(2): 304-310.
- [25] 杨竹强, 李天卉, 高天泽, 等. 跨临界碳氢二元混合物的水动力学与传热特性实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(6): 140-147.
- YANG Zhuqiang, LI Tianhui, GAO Tianze, et al. Experimental study on hydrodynamic and heat transfer characteristics of binary mixtures at trans-and supercritical pressures [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(6): 140-147.
- [26] BISHOP A A, SANDBERG R O, TONG L S. Forced-convection heat transfer to water at near-critical temperatures and supercritical pressures [EB/OL]. (1964-01-01) [2019-10-24]. <https://www.osti.gov/biblio/4595384>.
- [27] GNIELINSKI V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow [J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 1976, 16: 359-368.
- [28] JACKSON J D. Fluid flow and convective heat transfer to fluids at supercritical pressure [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, 264: 24-40.
- [29] BANUTI D T. Crossing the Widom-line; supercritical pseudo-boiling [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2015, 98: 12-16.
- [30] MAXIM F, KARALIS K, BOILLAT P, et al. Thermodynamics and dynamics of supercritical water pseudo-boiling [J]. *Advanced Science*, 2021, 8(3): 2002312.
- [31] 张海松, 徐进良, 朱鑫杰. 基于拟沸腾理论的超临界 CO₂ 管内传热恶化量纲分析 [J]. *物理学报*, 2021, 70(4): 044401.
- ZHANG Haisong, XU Jinliang, ZHU Xinjie. Dimensional analysis of flow and heat transfer of supercritical CO₂ based on pseudo-boiling theory [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(4): 044401.
- [32] BRASSINGTON D J, CAIRNS D N H. Measurements of forced convective heat transfer to supercritical helium [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1977, 20(3): 207-214.
- [33] CHENG X, YANG Y H, HUANG S F. A simplified method for heat transfer prediction of supercritical fluids in circular tubes [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2009, 36(8): 1120-1128.
- [34] MOKRY S, PIORO I, FARAH A, et al. Development of supercritical water heat-transfer correlation for vertical bare tubes [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(4): 1126-1136.
- [35] XU Jinliang, ZHANG Haisong, ZHU Bingguo, et al. Critical supercritical-boiling-number to determine the onset of heat transfer deterioration for supercritical fluids [J]. *Solar Energy*, 2020, 195: 27-36.
- [36] DUBEY S K, VEDULA R P, IYER K N, et al. Local heat transfer coefficient measurements using thermal camera for upward flow of Freon 22 in a vertical tube at supercritical conditions and development of correlations [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, 328: 80-94.

(编辑 武红江 亢列梅)