

DOI: 10.19527/j.cnki.2096-1642.2017.01.007

超临界压力煤油传热不稳定实验研究

胡江玉, 周进, 潘余, 王辉, 王宁, 任春雷
(国防科学技术大学航天科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

Experimental Investigation on Heat Transfer Instability of Kerosene at Supercritical Pressure

HU Jiang-yu, ZHOU Jin, PAN Yu, WANG Hui, WANG Ning, REN Chun-lei
(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

摘要: 在压力 2.5~4 MPa, 质量流量 0.7~1.7 g/s, 入口温度 20~250 °C 的实验条件下, 对煤油在内径 1 mm, 长度 300 mm 竖直上升圆管中的流动及传热不稳定现象进行了实验研究. 结果表明, 当热流密度增大到一定程度后, 传热不稳定开始发生. 不稳定发生的起始热流密度随压力和流量的增加而增大, 随入口油温的升高而减小, 且当入口油温升高到一定程度后无不稳定现象发生. 不稳定发生的初始时刻, 出口油温迅速增加, 管道壁温明显下降, 传热系数增大; 实验段局部流速增大, 进而在管道内部形成压力脉动并产生声音. 不稳定结束后, 出口油温几乎保持不变, 壁温会缓慢增加, 直至下一次不稳定发生.

关键词: 超临界压力传热; 传热不稳定; 压力脉动; 传热强化

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Abstract: The flow and heat transfer instabilities of kerosene flowing in a vertical upward circular tube were experimentally investigated. The tube is 1 mm in diameter and 300 mm in length. Pressure ranges from 2.5~4 MPa, mass flow rate ranges from 0.7~1.7 g/s and inlet temperature ranges from 300~520 K. Results indicate that heat transfer instability appears when the applied heating power exceeds a threshold value. It is found that the instability threshold power increases with the increasing of pressure and mass flow rate while it decreases with the increasing of inlet temperature. Heat transfer instability will not happen when inlet temperature reaches a certain value. At the initial state of the instability, the outlet temperature rises rapidly while the temperature of the section wall drops rapidly. Heat transfer coefficient increases during the instability. Increasing of the local flow velocity leads to the pressure pulsation and causes sounds. After the instability, the outlet temperature keeps almost constant while the wall temperature keeps rising until the next instability happens.

Key words: supercritical pressure heat transfer; heat transfer instability; pressure pulsation; heat transfer enhancement

引言

超临界流体在电站锅炉水冷壁、核反应堆、火箭推进主动冷却系统及超燃冲压发动机再生冷却系统等领域有着广泛的运用^[1-3]. 对超临界流体传热特性的研究发现, 超临界压力流体在加热的过程中会出现不稳定现象, 目前对不稳定的研究还处于机理探索的阶段^[4-6]. 一些文献对超临界压力水在平行管中不稳定的研究指出^[7-9], 增大压力和质量流率, 减小热流密度对传热稳定都是有利的. 在超临界压力二氧化碳的传热研究中发现^[10], 拟临界温

度附近物性的变化对流动和传热有很大的影响. 由于碳氢燃料在超燃冲压发动机中的应用前景, 超临界压力下碳氢燃料的传热特性越来越受到关注^[11-13]. 与超临界水和二氧化碳一样, 超临界压力下碳氢燃料在加热的过程中, 当热流密度增大到一定程度后, 会出现流动和传热的不稳定现象, 具体表现为温度和压力脉动明显, 管路剧烈波动, 同时伴随嘈杂声或呼啸声^[14-16], 这就是超临界碳氢燃料的传热不稳定现象. Wang 等^[17-18]根据实验段压降及出口油温变化将超临界煤油传热分为传热稳定

收稿日期: 2016-10-10; 修回日期: 2016-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(11372348)

引用格式: 胡江玉, 周进, 潘余, 等. 超临界压力煤油传热不稳定实验研究[J]. 气体物理, 2017, 2(1): 57-63.

Citation: Hu J Y, Zhou J, Pan Y, et al. Experimental investigation on heat transfer instability of kerosene at supercritical pressure[J]. Physics of Gases, 2017, 2(1): 57-63.

阶段、初始传热不稳定阶段、初始热声不稳定阶段及发展的热声不稳定阶段. 对碳氢燃料在常压至 6 MPa 压力下的传热实验研究表明^[19], 不稳定主要是近临界压力区碳氢燃料物性的剧烈变化, 壁面出现类似亚临界压力下的膜态沸腾导致的.

在以往超临界压力煤油传热不稳定研究中, 虽然观察到了油温、压力的剧烈震荡, 但是对油温突然上升的解释并没有将壁温变化考虑在内, 对热声的产生和压降的变化也一般认为是密度波不稳定导致的流量随时间变化引起的. 本文采用实验的手段, 对超临界压力下煤油在内径为 1 mm 的竖直上升圆管中传热不稳定特性开展研究, 结合煤油物性变化、壁温、实验段压降及油温随时间的变化分析了超临界压力煤油传热不稳定机理, 探讨了不同实验参数对传热不稳定的影响.

1 实验装置及设备

实验系统由煤油供应系统、电加热系统、预热段及实验段、测控系统等组成. 实验前先将煤油抽到储瓶内, 实验时煤油由高压压出, 并由针型阀对流量进行控制和调节. 在储瓶和预热段之间安装 Coriolis 流量计对流量进行测量. 预热段和实验段均采用电加热的方式, 即直接将电流加载到钢管上, 利用实验管本身的电阻产生热量. 预热段为内径 2 mm, 外径 6 mm, 长 2 m 的不锈钢管, 实验段为内径 1 mm, 外径 3 mm, 长 300 mm 的不锈钢管. 实验压力由出口背压阀进行控制. 图 1 和图 2 分别给出了实验系统和实验段示意图.

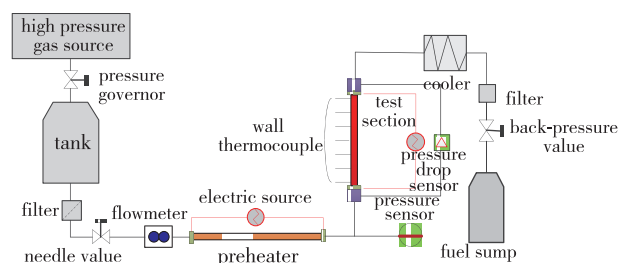


图 1 实验系统

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

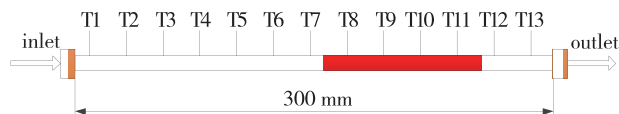


图 2 实验段及壁温测量

Fig. 2 Schematic diagram of test section and temperature measurement

实验主要测量煤油流量、实验段进出口油温、实验段沿管长壁温、实验段压力及压降、输出电流及电压. 实验流量由 Coriolis 流量计测量, 所用流量计为天津斯密特精密仪器有限公司生产的 DMF-1-1A 型, 流量测量范围为 0~11 g/s, 测量精度 $\pm 0.2\%$. 油温测量采用沈阳中色测温的 K 型铠装热电偶, 丝直径为 0.5 mm, 量程为 0~1200 $^{\circ}\text{C}$, 测量精度 $\pm 0.75\%$. 油温热电偶通过直径 2 mm 的卡套连接到四通, 实现密封. 壁温测量采用美国欧米伽公司生产的 K 型热电偶, 丝直径为 0.08 mm, 测量精度 1.1 K 或 0.4%. 测量时先将热电偶的两根丝结球, 然后焊接到要测的管外壁. 实验管内入、出口压力由麦克传感器有限公司生产的 MPM480 压阻式压力变送器进行测量, 量程为 0~10 MPa, 精度 $\pm 0.1\%$. 进行近临界压力区的不稳定性研究时, 实验管压差由麦克传感器有限公司生产的 MDM490 压阻式差压变送器进行测量, 量程为 0~350 kPa, 精度 $\pm 0.25\%$. 加载到实验管的电压、电流均采用 1 级精度的仪表进行测量, 并由电加热控制柜上的显示模块读取. 流动及传热计算中的数据主要来自于北京航空航天大学能源学院的实验结果^[20-22] 及美国国家标准局的 supertrapp 程序^[23]. 实验前对热电偶的测量精度及壁温测量的均匀性进行了检验, 并在干烧下对实验段电阻率和散热进行了标定.

实验参数: 质量流量为 0.7, 1.2, 1.7 g/s, 加热热流密度为 0.1~1.8 MW/m^2 , 入口油温为 20, 110, 150, 200 及 250 $^{\circ}\text{C}$; 压力为 2.5, 3, 3.5 及 4 MPa.

2 不稳定现象及特性分析

2.1 不稳定现象

对煤油在超临界压力下传热特性的实验研究发现, 当热流密度较大时, 会出现流动与传热的不稳定现象. 不稳定发生时, 壁温、油温会出现振荡, 同时伴随锤击、啸叫等声响.

图 3 为一组典型工况下煤油传热不稳定发生时出口油温及出口压力随时间的变化, 实验流量为 1.2 g/s, 入口油温为 20 $^{\circ}\text{C}$, 压力为 4 MPa, 电加热热流密度为 1.24 MW/m^2 . 从图中可以看出, 当不稳定发生时, 出口油温出现大幅振荡, 变化幅值高达 55 $^{\circ}\text{C}$, 实验段压降幅值则高达 30 kPa. 在整个实验中发现, 对该工况, 当热流密度达 1.24 MW/m^2 及以上时, 这种压力和油温的振荡现象一直存在, 并且伴随声响, 同时整个实验管路还会发生机械振动.

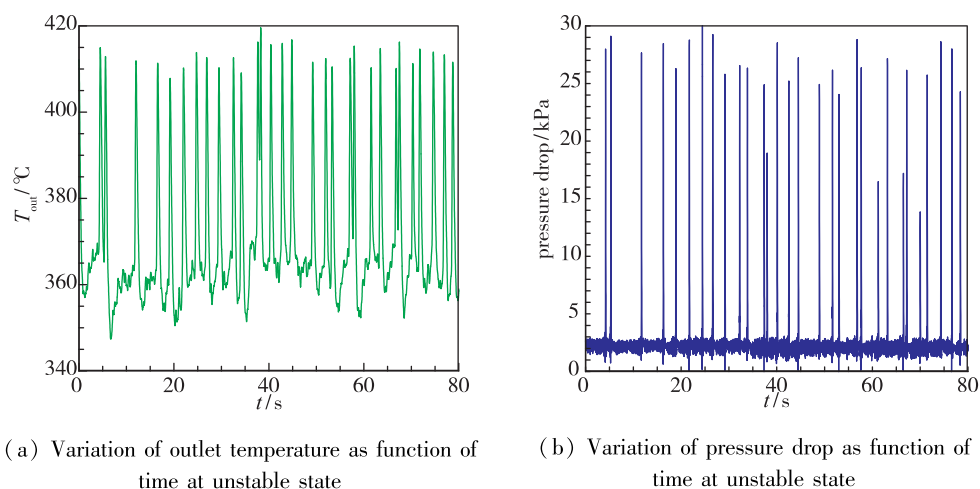


图3 不稳定实验段出口油温、压降随时间变化(1.2 g/s, $T_{in} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 MPa, 1.24 MW/m²)

Fig. 3 Outlet temperature and pressure drop as function of time at unstable state(1.2 g/s, $T_{in} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 MPa, 1.24 MW/m²)

作为对比, 图4给出了一组稳定工况时出口油温、压力随时间的变化, 实验流量为1.2 g/s, 入口油温为20 $^{\circ}\text{C}$, 压力同样为4 MPa, 加热热流密度为1.09 MW/m². 从图中可以看出, 出口油温的波动非

常小, 在6 $^{\circ}\text{C}$ 以内, 出口压力的波动也非常小, 只有约2 kPa. 出口油温和压力的波动均比不稳定时低一个数量级.

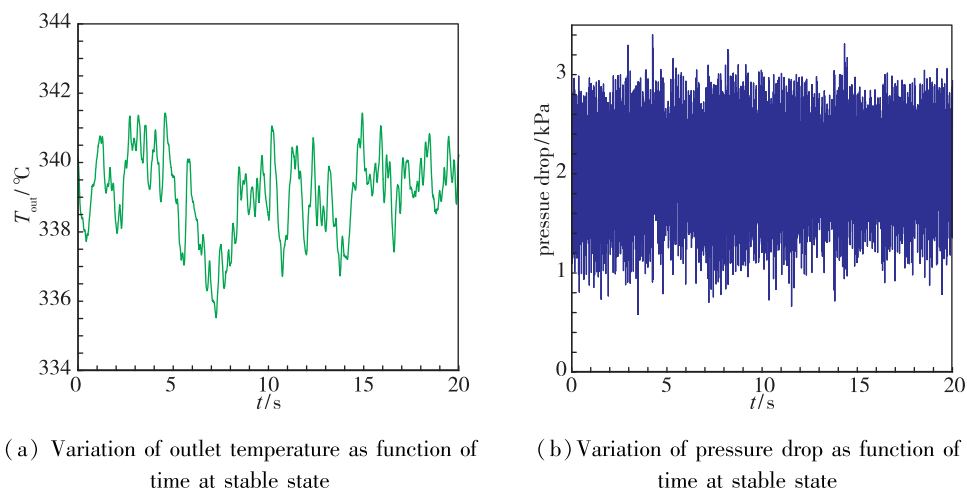


图4 稳定时出口油温、实验段压降随时间变化(1.2 g/s, $T_{in} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 MPa, 1.09 MW/m²)

Fig. 4 Outlet temperature and pressure drop as function of time at stable state(1.2 g/s, $T_{in} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 MPa, 1.09 MW/m²)

2.2 不稳定时流动和传热特性分析

不稳定发生时 Coriolis 流量计读数和出口流量测量均表明, 实验段进口和出口流量均无明显变化. 图5为图3中不稳定发生时24~32 s期间部分测点壁温、油温随时间的变化. 从图5不难发现, 壁温和出口油温的变化呈相反的规律, 即在壁温下降时, 出口油温迅速升高; 而在壁温上升时, 出口油温先迅速下降至不稳定前的水平, 然后保持稳定, 直到下一次不稳定发生. 壁温和出口油温的这种变化必然造成实验段不同位置处流动和传热系数随时间的变化: 壁温下降、出口油温上升的阶段 Reyn-

olds 数和传热系数均增大, 而在壁温上升、出口油温下降并保持稳定时 Reynolds 数和传热系数均较小.

为了分析超临界压力煤油传热不稳定实验段内流动和传热的变化, 必须对不同实验工况下管道壁温变化和出口油温的热平衡进行计算, 表1给出了部分实验的计算结果. 将实验段减少的热量考虑在内时, 不稳定发生的初始时刻出口油温急剧上升的理论计算结果与实测上升值非常接近, 这说明分析不稳定发生时流动与传热的变化必须将实验段壁温下降导致的热量减少考虑在内.

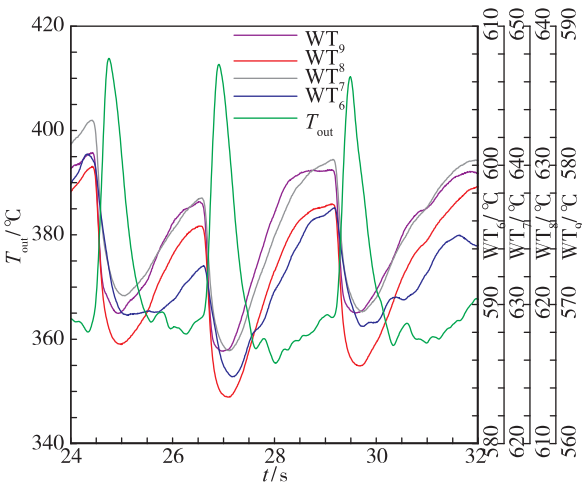


图 5 不稳定时部分壁温和出口油温随时间变化
(1.2 g/s, $T_{in}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 MPa, 1.24 MW/m²)

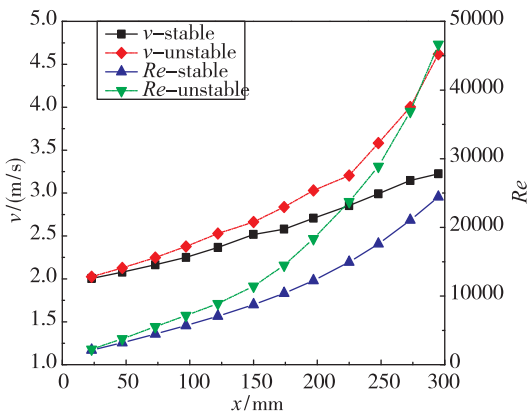
Fig. 5 Wall temperature and outlet temperature as function of time at unstable state(1.2 g/s, $T_{in}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 MPa, 1.24 MW/m²)

表 1 不稳定时管道壁温变化与出口油温变化热平衡计算

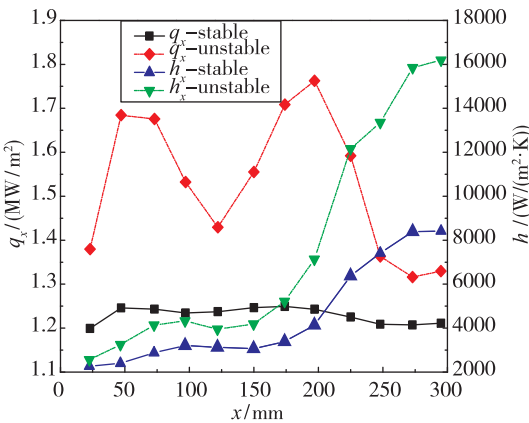
Table 1 Heat balance of wall temperature and outlet temperature

$\dot{m}/(\text{g/s})$	pressure/ MPa	$T_{in}/^{\circ}\text{C}$	rise of $T_{out}/^{\circ}\text{C}$ (measured values)	rise of $T_{out}/^{\circ}\text{C}$ (calculated values)
0.7	2.5	20	73.19	72.25
0.7	3	20	48.55	47.01
0.7	3	111	13.75	12.3
0.7	3	150	14.61	13.34
0.7	3.5	20	44.29	45.12
0.7	4	20	55.24	56.47
1.2	2.5	20	28.03	29.14
1.2	2.5	111	15.22	16.07
1.2	2.5	150	7.65	6.93
1.2	3	20	41.79	42.61
1.2	3	111	13.55	14.53
1.2	3	150	11.04	10.19
1.2	3.5	20	36.05	37.55
1.2	3.5	111	22.39	20.92
1.2	3.5	150	13.20	11.64
1.2	4	20	55.61	54.48
1.2	4	111	14.42	12.27
1.7	2.5	20	60.70	62.91
1.7	3	20	29.91	30.97
1.7	3	111	9.67	10.78
1.7	3	150	10.48	10.77
1.7	3.5	20	7.40	7.13
1.7	4	20	5.76	5.39

将实验段壁温下降减少的热量考虑在内, 对流量为 1.2 g/s, 入口油温为 20 $^{\circ}\text{C}$, 压力为 4 MPa 下不稳定时油温稳定阶段和油温迅速上升阶段的流速和 Reynolds 数、热流密度和传热系数沿实验段的变化进行计算, 所得结果分别如图 6(a) 和(b) 所示. 从图6(a)中可以看出, 出口油温迅速上升阶段流速和 Reynolds 数均比出口油温稳定时要高, 且沿实验段方向二者差别逐渐增大, 这说明不稳定加大了流动的湍流强度. 不稳定时实验段出口流速(4.7 m/s)比稳定时(3.3 m/s)快 1.4 m/s, 局部流速的急剧增加会在管道内形成冲击, 导致压力脉动, 在管道内部产生声音. 从图 6(b)中可以发现, 不稳定发生时, 出口油温迅速上升阶段壁面热流密度和传热系数均比出口油温稳定时高出很多, 说明不稳定发生时实验段内传热得到强化.



(a) Flow velocities and Reynolds numbers at different locations



(b) Heat fluxes and HTC at different locations considering variation of wall temperature

图 6 不稳定时流动和传热变化(1.2 g/s, $T_{in}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 MPa)

Fig. 6 Flow and heat transfer changes of instability
(1.2 g/s, $T_{in}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 MPa)

3 不同参数对不稳定起始热流密度的影响

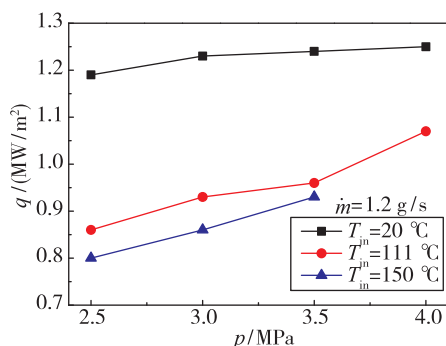
对不同实验工况, 不稳定发生的起始热流密度不一样, 且当入口温度升高到一定程度时, 实验中无明显不稳定现象. 因此, 必须对不同实验参数下不稳定的起始热流密度开展研究, 为进一步的研究打下基础.

为了研究不稳定发生时的初始热流密度, 首先要对不稳定发生时壁温、油温和煤油在实验段径向的温度和物性分布展开分析, 理解不稳定发生的必要条件. 以上文质量流量为 1.2 g/s, 压力为 4 MPa, 入口油温为 20 °C 为例进行初步分析. 4 MPa 压力下煤油的拟临界温度约为 428.12 °C (701.27 K^[18]). 从图 5 可以看出, 稳定阶段出口油温比拟临界温度约低 70 °C, 不稳定时出口油温的峰值也未达到拟临界温度, 这表明整个实验段内主流油温均在拟临界以下; 而整个实验阶段壁温均比拟临界温度高出 60~220 °C. 壁温远高于拟临界温度, 而主流温度均在拟临界以下, 这说明不稳定发生时实验段内拟临界温度附近的流体已经占到一定比例. 拟临界温度附近的这些流体物性会随温度的变化发生剧烈的

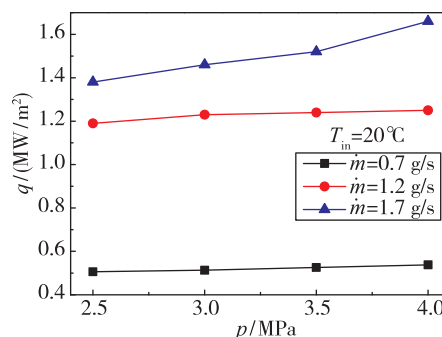
变化, 进而对超临界流体的流动和传热特性带来较大影响. 同时, 不稳定时近壁面流体温度远高于主流温度, 流体在径向的温度梯度很大, 流体径向层与层之间物性、流动和传热能力差异较大.

3.1 压力影响

图 7 给出了不同入口油温下压力对不稳定起始热流密度的影响及不同质量流量下压力对不稳定起始热流密度的影响. 图 7(a) 中入口油温为 150 °C、压力为 4 MPa 的实验工况下并没有发生不稳定, 故没有对应的不稳定起始热流密度. 从图 7 可以看出不同质量流量和入口油温下不稳定发生的起始热流密度随实验压力的变化呈相同的规律, 即压力越高, 不稳定发生的起始热流密度越高. 从上文不稳定发生时壁温和油温随时间变化及流动和传热特性的变化可以发现, 不稳定时壁温远高于拟临界温度, 实验段内拟临界温度附近流体占到一定比例, 流动和传热均发生了较大变化. 煤油压力越大, 对应的拟临界温度越高, 因此在流量或入口油温相同的情况下, 实验段壁温升高到拟临界温度以上, 发生不稳定所需的热流密度也越高.



(a) Effects of operating pressure on threshold power for different inlet temperatures



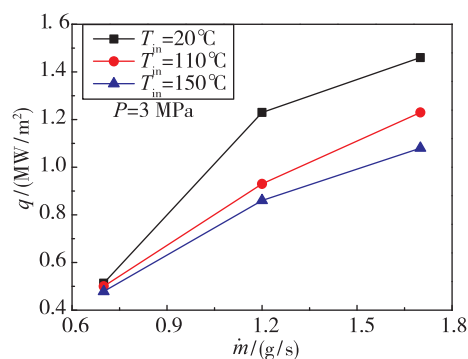
(b) Effects of operating pressure on threshold power for different mass flow rates

图 7 压力对不稳定初始热流密度的影响

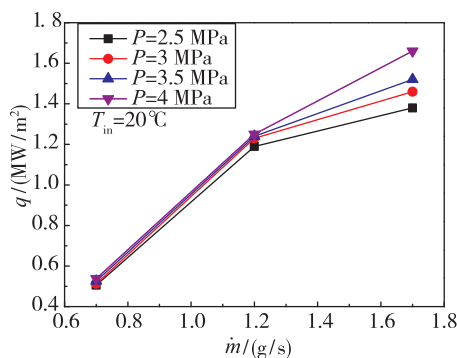
Fig. 7 Effects of pressure on instability heat flux

3.2 流量影响

图 8(a) 和 (b) 分别给出了不同入口油温下流量对不稳定起始热流密度的影响及不同压力下流量对不稳定起始热流密度的影响. 从图 8 可以看出, 不同压力和入口油温下不稳定发生的起始热流密度均随实验流量的增加而增大. 由于不稳定时壁温远高于拟临界温度, 且实验段内拟临界温度附近流体占到一定比例. 流量越大, 流动湍流度越大, 实验段内换热能力越强, 实验段壁温升高到高于拟临界温度所需的热量也越大. 因此流量增大时, 对应的不稳定起始热流密度也越高.



(a) Effects of mass flow rate on threshold power for different inlet temperatures



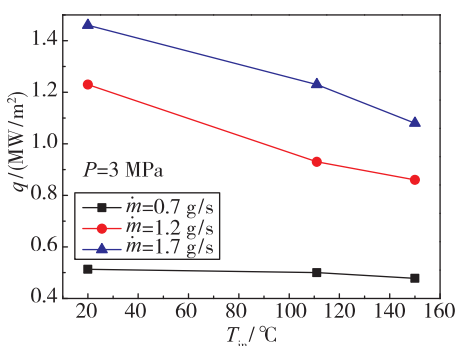
(b) Effects of mass flow rate on threshold power for different operating pressures

图8 质量流量对不稳定初始热流密度影响

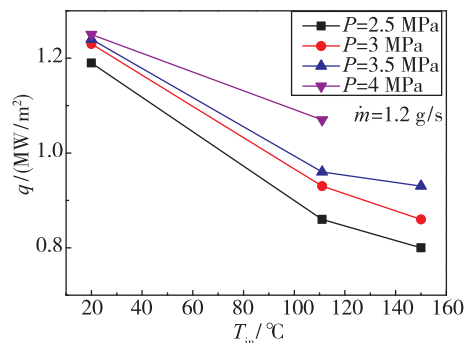
Fig. 8 Effects of mass flow rate on instability heat flux

3.3 入口油温影响

图9(a)和(b)分别给出了不同质量流量下入口油温对不稳定起始热流密度的影响及不同压力



(a) Effects of inlet temperature on threshold power for different mass flow rates



(b) Effects of inlet temperature on threshold power for different operating pressures

图9 入口油温对不稳定初始热流密度影响

Fig. 9 Effects of inlet temperature on instability heat flux

4 结论

本文对超临界压力航空煤油在竖直上升微细圆管内传热不稳定性进行了实验研究和分析, 主要结论如下:

(1) 不稳定发生时, 实验段本身的热量被煤油吸收, 壁温明显下降, 热流密度和传热系数均增大, 实验段流速、Reynolds数和出口油温迅速增加。

(2) 压力与不稳定发生的起始热流密度并不是简单的线性关系, 总的说来, 不稳定发生的起始热流密度随实验压力的升高而增大。

(3) 不稳定发生的起始热流密度和流量成正相关的关系, 即流量越大, 对应的不稳定起始热流密度也越大。

(4) 随着入口油温的升高, 将煤油加热至不稳

定入口油温对不稳定起始热流密度的影响。从图9可以看出, 入口油温越高, 不稳定发生的起始热流密度越小。由于不稳定时壁温远高于拟临界温度, 且实验段内拟临界温度附近流体占到一定比例。入口油温越高, 壁温升高到远高于拟临界温度、实验段内拟临界温度附近流体达到一定比例所需的热量越少, 故不稳定发生的起始热流密度也越小。

实验发现, 当入口油温高于 200 °C 时, 并没有出现明显不稳定现象, 这主要是因为入口油温越大, 流动湍流度越大, 换热能力越强。例如, 在质量流量为 1.2 g/s, 入口油温为 200 °C 的实验条件下, 入口 Reynolds 数已高达 8000 以上, 接近充分发展的湍流, 实验段内传热系数很高, 壁温始终维持在较低水平; 继续增加热流密度, 出口油温已经高于拟临界温度, 但是依然没有出现不稳定。

定所需的热流密度减小; 当入口油温高到一定程度时, 不发生不稳定。

参考文献 (References)

- [1] Jiang D F, Xu H, Deng B, et al. Effect of oxygenated treatment on corrosion of the whole steam-water system in supercritical power plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 1248-1253.
- [2] Yoshida S, Mori H. Heat transfer to supercritical pressure fluids flowing in tubes[C]. Proceedings of the 1st International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactor Design and Technology, Tokyo, 2000.
- [3] Deepak D, Jeenu R. Endothermic fuels for supersonic ramjet[J]. Journal of the Indian Chemical Society, 2003, 80(5): 535-543.
- [4] Chatoorgoon V. Non-dimensional parameters for static in-

- stability in supercritical heated channels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 64: 145-154.
- [5] Ampomah-Amoako E, Ambrosini W. Developing a CFD methodology for the analysis of flow stability in heated channels with fluids at supercritical pressures[J]. Annals of Nuclear Energy, 2013, 54: 251-262.
- [6] Zhou W X, Yu B, Qin J, et al. Mechanism and influencing factors analysis of flowing instability of supercritical endothermic hydrocarbon fuel within a small-scale channel[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 71: 34-42.
- [7] Su Y L, Feng J, Zhao H, et al. Theoretical study on the flow instability of supercritical water in the parallel channels[J]. Progress in Nuclear Energy, 2013, 68: 169-176.
- [8] Xi X, Xiao Z J, Yan X, et al. Numerical simulation of the flow instability between two heated parallel channels with supercritical water[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 64: 57-66.
- [9] Dutta G, Zhang C, Jiang J. Analysis of parallel channel instabilities in the CANDU supercritical water reactor[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 83(4): 264-273.
- [10] Garimella S, Mitra B, Andresen U C, et al. Heat transfer and pressure drop during supercritical cooling of HFC refrigerant blends[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 91: 477-493.
- [11] Wang N, Pan Y, Zhou J. Research status of active cooling of endothermic hydrocarbon fueled scramjet engine[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2013, 227(11): 1780-1794.
- [12] Fu Y C, Tao Z, Xu G Q, et al. Experimental study of flow distribution for aviation kerosene in parallel helical tubes under supercritical pressure[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 90: 102~109.
- [13] Zhu J Q, Tao Z, Deng H W, et al. Numerical investigation of heat transfer characteristics and flow resistance of kerosene RP-3 under supercritical pressure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 91: 330-341.
- [14] Hines W S, Wolf H. Pressure oscillations associated with heat transfer to hydrocarbon fluids at supercritical pressures and temperatures[J]. ARS Journal, 1962: 361-366.
- [15] Hitch B, Karpuk M. Experimental investigation of heat transfer and flow instabilities in supercritical fuels[R]. AIAA 1997-3043, 1997.
- [16] Hitch B, Karpuk M. Enhancement of heat transfer and elimination of flow oscillations in supercritical fuels[R]. AIAA 1998-3759, 1998.
- [17] Wang H, Zhou J, Pan Y, et al. Experimental investigation on the onset of thermo-acoustic instability of supercritical hydrocarbon fuel flowing in a small-scale channel[J]. Acta Astronautica, 2015, 117: 296-304.
- [18] Wang H, Zhou J, Pan Y, et al. Experimental investigation on the characteristics of thermo-acoustic instability in hydrocarbon fuel at supercritical pressures[J]. Acta Astronautica, 2016, 121: 29~38.
- [19] 蒋榕培, 于茂杰, 游岳, 等. 近临界区碳氢燃料传热不稳定规律研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2015(3): 79-81.
- Jiang R P, Yu M J, You Y, et al. Research on the unstable heat transfer behavior of hydrocarbon fuel in near-critical region[J]. Missiles and Space Vehicles, 2015(3): 79-81 (in Chinese).
- [20] Deng H W, Zhu K, Xu G Q, et al. Isobaric specific heat capacity measurement for kerosene RP-3 in the near-critical and supercritical regions[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2012, 57, 263-268.
- [21] Deng H W, Zhang C B, Xu G Q, et al. Viscosity measurements of endothermic hydrocarbon fuel from (298 to 788)K under supercritical pressure conditions[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2012, 57, 358-365.
- [22] Deng H W, Zhang C B, Xu G Q, et al. Density measurements of endothermic hydrocarbon fuel at sub- and supercritical conditions[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2011, 56: 2980-2986.
- [23] Huber M L. NIST thermophysical properties of hydrocarbon mixtures database (SUPERTRAPP) version 3.2 user guide [DB/OL]. (2007) [2016-05-06] https://www.researchgate.net/publication/237625399_NIST_Thermophysical_Properties_of_Hydrocarbon_Mixtures_Database.

作者简介:

胡江玉(1991-) 男, 湖北监利, 硕士研究生, 研究方向为超燃冲压发动机热防护. 通信地址: 国防科技大学航天科学与工程学院(410073). E-mail: hujiangyuqw@sina.com.