

超临界压力航空煤油不稳定流动实验

王彦红¹, 李素芬², 赵星海¹

- (1. 东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012;
2. 大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 对竖直上升圆管内超临界压力航空煤油的不稳定流动开展了实验研究。考察了管内壁温度、质量流量、出口温度、进出口压差等参数随时间的振荡情况,阐述了不稳定流动的诱发原因和反馈机制,建立了不稳定流动临界热负荷的预测关系式。结果表明:不稳定流动工况中发现了管内壁温度和进出口压差的异常波动。边界层发展过程中传热恶化形成类气膜是不稳定流动的诱因,存在两种类型的反馈机制:一方面,类膜态沸腾和类核态沸腾交替引发恶化换热和强化换热,导致热力不稳定;另一方面,压力扰动出现声波,压缩波使类气膜厚度减小且传热改善,膨胀波使类气膜厚度增大且传热变差,导致声波不稳定。两种反馈机制的综合作用形成热声振荡现象。

关 键 词: 超临界压力; 航空煤油; 不稳定流动; 热力不稳定; 声波不稳定

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Experiment on flow instability of aviation kerosene under supercritical pressures

WANG Yanhong¹, LI Sufen², ZHAO Xinghai¹

- (1. School of Energy and Power Engineering,
Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012, China;
2. School of Energy and Power Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

Abstract: Experimental study on flow instability of aviation kerosene under supercritical pressure in a vertical upward circular tube was conducted. The time-dependent inside-wall temperature, mass flux, outlet temperature and inlet-outlet pressure drop oscillations were investigated. The formation reason and feedback mechanism of flow instability were expounded. The expression for critical heat load prediction of flow instability was obtained. Results indicated that the abnormal fluctuations of inside-wall temperature and inlet-outlet pressure drop occurred under the flow instability conditions. The flow instability was caused by a gas-like state film, owing to the deteriorated heat transfer during the development process of boundary layer. Two types of feedback mechanism were found. On the one hand, the deteriorated and enhanced heat transfer appeared alternately due to the pseudo-film boiling and pseudo-nuclear boiling, which led to the thermal instability. On the other hand, the pressure disturbance triggered the acoustic wave, the compressed wave made a decrease in thickness

收稿日期: 2017-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(51576027); 东北电力大学博士科研启动基金(BSJXM-2017205)

作者简介: 王彦红(1983—),男,讲师,博士,主要从事超临界压力碳氢燃料流动换热研究。

引用格式: 王彦红,李素芬,赵星海. 超临界压力航空煤油不稳定流动实验[J]. 航空动力学报,2018,33(12):2838-2844. WANG Yanhong, LI Sufen, ZHAO Xinghai. Experiment on flow instability of aviation kerosene under supercritical pressures[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(12): 2838-2844.

of gas-like state film, and enhanced the heat transfer, while the expansion wave made an increase in thickness of gas-like state film, and weakened the heat transfer, leading to the acoustic wave instability. The comprehensive effects of these two feedback mechanisms cause the thermo-acoustic oscillation phenomenon.

Key words: supercritical pressure; aviation kerosene; flow instability; thermal instability; acoustic wave instability

采用机载碳氢燃料作为冷却剂的再生冷却可以有效解决超燃冲压发动机的热防护问题^[1]。再生冷却通道中,碳氢燃料工作压力高于其临界压力,超临界压力下温度改变引起燃料热物性剧烈变化,尤其在拟临界温度附近,这种效应将更加突出^[2-4],可能导致不稳定流动换热现象^[5],引发通道剧烈振荡,对系统安全运行带来不利的影响^[6]。相关科学问题引起了航空航天学者的高度重视。

目前,对于超临界压力碳氢燃料的不稳定流动换热现象已经开展了一定的基础研究。Linne 等^[7]、Brad 等^[8-9]开展了竖直圆管内 JP-7 航空煤油的不稳定流动研究。研究表明,不稳定流动仅发生在近临界压力范围内,具有强化换热的效果,提高压力可以有效地避免这一现象。Liu 等^[10]、Yang 等^[11]对水平圆管内某类型航空煤油的对流换热进行了研究,发现不稳定流动过程中伴随着声响,是一种热声振荡现象。前者认为热声振荡有恶化换热的作用;后者提出热声振荡是强化换热的因素。Wang 等^[12-13]考察了短通道内 RP-3 航空煤油热声振荡的特性和边界问题,分析了运行参数对进出口压降振幅和周期的影响,以及振荡临界热流密度随运行参数的变化特征。Yan 等^[14-15]对竖直圆管内正癸烷的对流换热不稳定做了研究,发现了转捩型和密度波型两种不稳定流动现象,得到了提高进口温度、运行压力或采用下降流动方式能够弱化不稳定流动的结论。Zhou 等^[16]阐述了水平圆管内正癸烷不稳定流动的形成机理和反馈机制,不稳定流动出现在拟临界区和热裂解区,是由密度剧变诱发的压力降型流动不稳定,提高管道热容、压缩体积刚性系数或者降低质量流量是抑制不稳定流动的有效措施。胡江玉等^[17]考察了航空煤油的流动传热不稳定,提出振荡声响是由管道局部流速增大形成压力脉动引起的。虽然上述研究对超临界压力碳氢燃料的不稳定流动有了基础的了解,但复杂的热物性变化导致了不稳定流动类型的多样化,特别是对于航空煤油这种混合碳氢燃料,不稳定流动的形成机制和量化预测问题还没有得到完善解决,需要进

行大量的后续研究。

本文以超临界压力下 RP-3 航空煤油为研究对象,考察其在竖直上升圆管内的不稳定流动现象。通过振荡参数分析,构建不稳定流动的诱发原因和反馈机制,实现不稳定流动边界的量化预测,为超燃冲压发动机再生冷却系统避免危害性振荡提供了有益的指导。

1 实验系统及数据处理

1.1 实验系统

图 1 给出了 RP-3 航空煤油不稳定流动换热实验系统。该实验系统由供油增压、预热加热、数据测量和采集、冷却回收四个部分组成。煤油由油箱供给经恒流泵升压后,进入实验管路。在实验管路中,煤油由流量计测量质量流量后进入预热段和实验段。两段均由 1Cr9Ni9Ti 不锈钢制成,采用 Aspen 纳米材料保温。实验段管外径和内径分别为 2.2 mm 和 1.8 mm。实验段进口和出口处均留有 100 mm 长的绝热段,用以保证进口流动的充分发展和避免出口效应的影响。两绝热段之间的长度为 500 mm,管道外表面等距地焊有 20 个(两电极之间有 21 个等距间隔)直径为 0.1 mm 的 K 型镍铬-镍硅热电偶(用 TC 表示,沿流向编号为 TC01~TC20)用于测量管壁温度。实验时 RP-3 煤油竖直上升流动,实验段通交流电

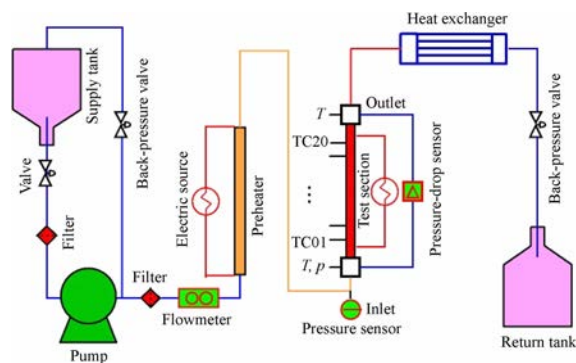


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

利用管电阻对煤油进行加热,加热功率由电压和电流计算得到。实验段煤油进口温度和出口温度由 K 型铠装热电偶测得,进口压力和进出口压差分别采用压力变送器及压差变送器测量。测量数据统一输送到数据采集系统,每秒采集两次数据。煤油流出实验段后进入冷却器冷却到常温,经背压阀流入到回油箱。

实验参数,如质量流量 $\dot{m}$ 、压力 p 、进出口压差 Δp 、电压 U 、电流 I 、进口温度 T_{in} 、出口温度 T_{out} 、管外壁温度 T_{wo} 的测量范围和测量误差见表 1。

表 1 测量范围和测量误差

Table 1 Measurement range and deviation

参数	测量范围	误差/%
$\dot{m}/(\text{g/s})$	0~20	± 0.50
p/MPa	0~7	± 0.15
$\Delta p/\text{kPa}$	0~1000	± 0.15
U/V	0~150	± 0.10
I/A	0~100	± 0.10
$T_{in}, T_{out}/\text{K}$	273.15~873.15	± 0.60
T_{wo}/K	273.15~973.15	± 0.60

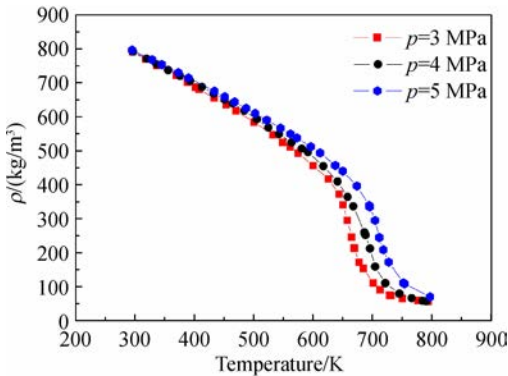
实验参数范围:压力为 3~5 MPa,质量流量为 1.5~3.0 g/s。实验管进口油温为 313~403 K,热流密度为 200~600 kW/m²。

1.2 实验工质

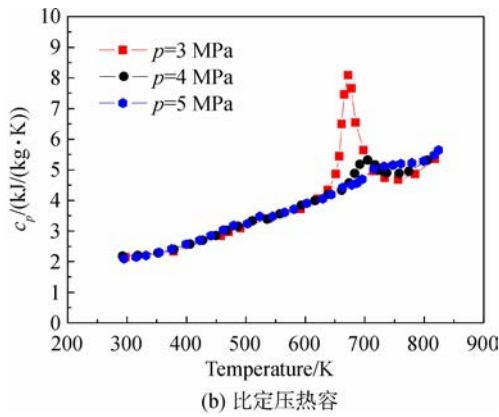
实验工质选用 RP-3 航空煤油,其临界压力为 2.34 MPa^[18],临界温度为 645.04 K^[18]。图 2 给出了三种压力(p)下密度(ρ)和比定压热容(c_p)随温度的变化情况^[19-20]。

1.3 数据处理

管壁热流密度(q)为管电阻热源产生的热流



(a) 密度



(b) 比定压热容

图 2 RP-3 航空煤油密度和比定压热容随温度的变化情况

Fig. 2 Density and specific pressure heat capacity of RP-3 aviation kerosene variations with temperature

扣除散热损失的热流,计算方法如下:

$$q = \frac{I^2 \rho \Delta l}{\pi(d_o^2 - d_i^2)/4} - q_{\text{loss}} \tag{1}$$

式中 ρ 为电阻率, d_o 、 d_i 为管外直径和内直径; Δl 为加热长度微元; q_{loss} 为散热热流密度,见文献[21]。

管内壁温度的计算公式如下:

$$T_{wi} = T_{wo} - \frac{1}{\kappa} \left[\left(\frac{\Phi d_o^2}{8} - \frac{q_{\text{loss}} d_o}{2} \right) \ln \frac{d_o}{d_i} - \frac{\Phi}{16} (d_o^2 - d_i^2) \right] \tag{2}$$

式中 κ 为管热导率; Φ 为内热源,具体形式见文献[21]。

不确定度分析表明,管壁热流密度和管内壁温度的不确定度分别为 $\pm 0.46\%$ 和 $\pm 0.85\%$ 。

2 实验结果与分析

2.1 不稳定流动参数分析

本节研究中,煤油质量流量为 2.0 g/s,进口温度为 373.15 K,热流密度为 300~500 kW/m²。图 3 给出了三种热流密度下管内壁温度随时间(t)的变化情况,压力为 3 MPa。0 s 表示热流密度为 300 kW/m² 时的加热起始时刻。该工况结束后紧接着进行了两种高热流密度的实验工况。由图可见,热流密度为 300 kW/m² 时,管内壁温度没有产生振荡,属于稳定流动工况。两种高热流密度下出现了伴随金属锤击声响的不稳定流动现象。热流密度为 400 kW/m² 时,管内壁温度的振荡较为剧烈,振幅沿流动方向呈先增大后减小再增大的变化。由于振荡周期较大,振荡不连续,声响时有时无,属于半稳定流动工况。热流密度为

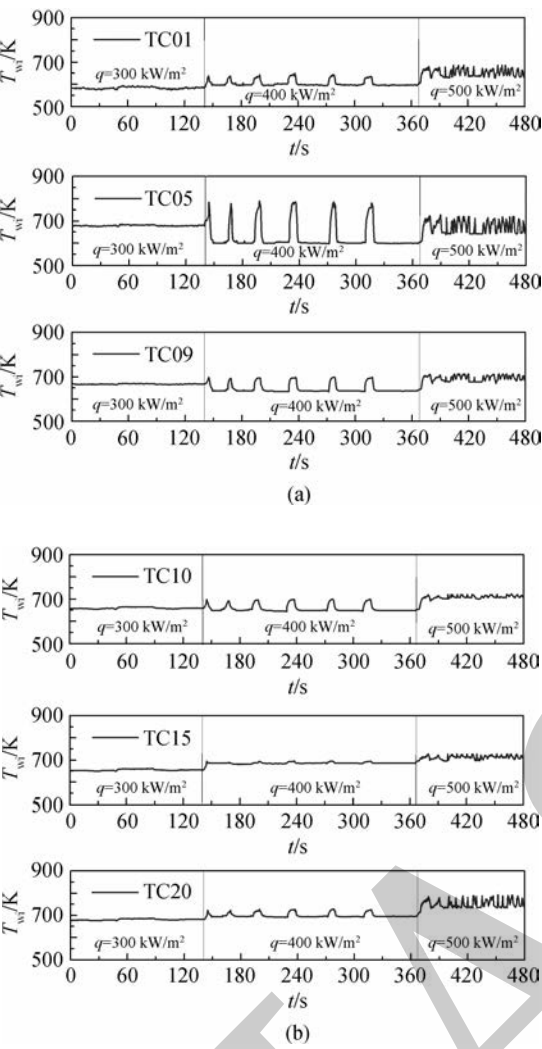


图 3 管内壁温度随时间的变化情况 ($p=3\text{ MPa}$)
Fig. 3 Inside-wall temperature variation with time ($p=3\text{ MPa}$)

500 kW/m² 时,管内壁温度振荡的周期缩短,振幅较小且变化平缓,振荡呈连续性,声响尖锐不间断,属于完全不稳定流动工况。

图 4 给出了三种热流密度下质量流量、出口油温、进出口压差随时间的变化情况,压力为 3 MPa。由图可以看到,不稳定流动工况和稳定流动工况的质量流量波动都很微弱,振幅基本不变。由于恒流泵是往复式的,存在一定质量流量波动。显然,这是由泵扰动引起的。出口油温的波动轻微,基本在 10 K 以内,对不稳定流动的影响可以忽略。进出口压差在不稳定流动和稳定流动两种情况下有很大差别。热流密度为 300 kW/m² 时,进出口压差的波动极为轻微;热流密度为 400 kW/m² 时,压差波动加剧;热流密度为 500 kW/m² 时,压差振幅进一步提高。出口雷诺数低于 7.2×10^3 ,处于过渡流区,边界层由层流向湍

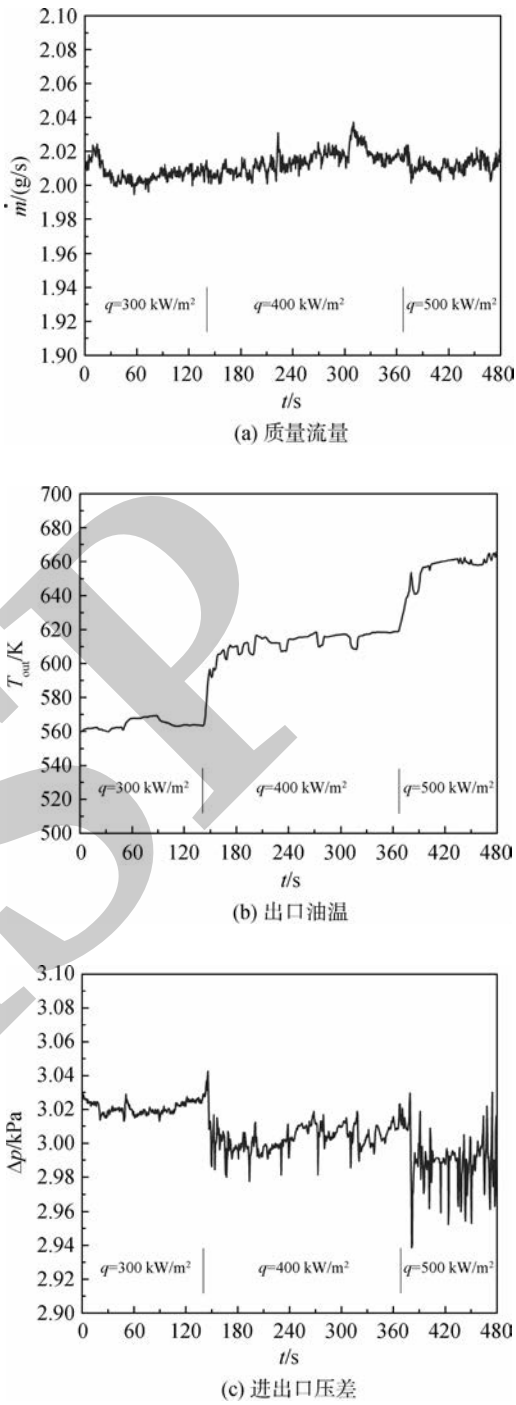


图 4 质量流量、出口油温、进出口压差随时间的变化情况 ($p=3\text{ MPa}$)
Fig. 4 Mass flux, outlet temperature and inlet-outlet pressure drop variations with time ($p=3\text{ MPa}$)

流转变,表现为先恶化后强化的复杂换热现象。因此,不稳定流动的形成不仅取决于边界层流体特殊的换热状况,还与进出口压差的异常波动密切相关。

图 5 给出了热流密度为 400 kW/m²,三种压力下 TC05 处管内壁温度随时间的变化情况。图中:0 s 表示各压力下的加热起始时刻。由图可以

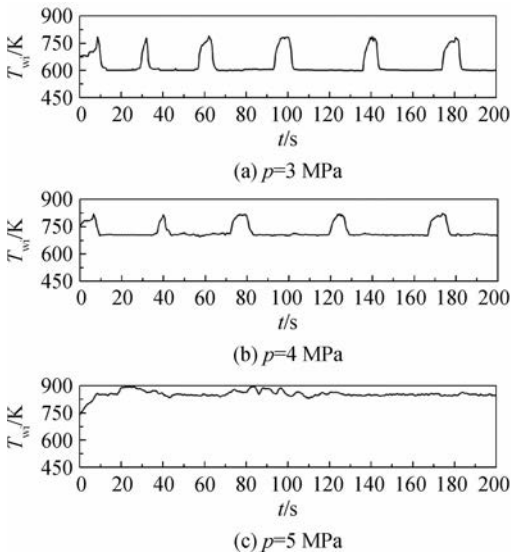


图 5 不同压力下管内壁温度随时间的变化情况
Fig. 5 Inside-wall temperature variations with time under different pressures

发现,压力提高到 4 MPa,管内壁温度的振幅减小,周期增大。同时,实验中也观察到声响弱化且间隔增大的现象。压力为 5 MPa 时,壁温振荡没有出现,为稳定流动工况。显然,这是由热物性变化随压力提高趋于平缓引起的。同时也可以得到结论:不稳定流动现象的边界不仅与热流密度相关,也取决于运行压力,两者共同决定了热物性变化的剧烈程度,进而决定了边界层流体的换热状况。

图 6 给出了三种压力下进出口压差随时间的变化情况,热流密度为 400 kW/m²。由图可以发现,两种低压力不稳定流动工况的压差振幅并没

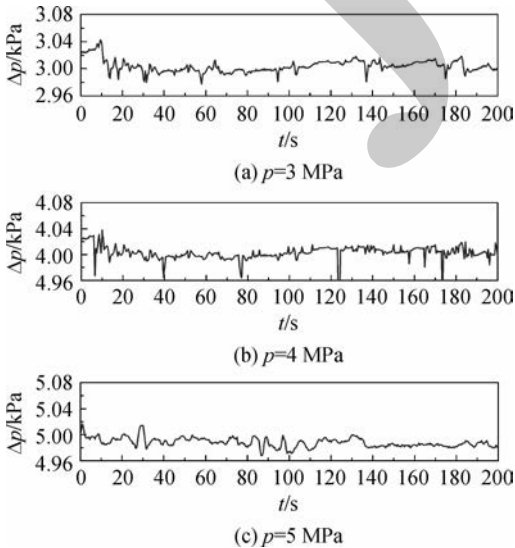


图 6 不同压力下进出口压差随时间的变化情况
Fig. 6 Inlet-outlet pressure drop variations with time under different pressures

有显著差异。压力为 5 MPa 时,压差虽然出现局部波动,但没有表现出规律性,不会对流动产生影响。

2.2 不稳定流动机理分析

本节研究中运行参数与上节相同。首先分析内壁温波动的形成机理,即换热不稳定问题。图 7 给出了两种压力下振荡峰值处平均内壁温度 $\bar{T}_{wi}$ 沿流动方向的变化情况,热流密度为 400 kW/m²。由图可以看到,两种压力下该温度分别高于相应的拟临界温度(图 2 中比定压热容峰值对应的温度)672 K 和 697 K,拟临界温度附近密度急剧降低,壁面覆盖了大量低密度的热流体,形成类气膜,即出现类膜态沸腾,导致传热恶化;振荡谷值处高密度的冷流体重新占据壁面,形成类核态沸腾,导致传热强化。这与亚临界压力两相流体热力型不稳定的机理类似,其存在膜态沸腾传热恶化和核态沸腾换热强化交替出现的反馈机制。该内壁温度波动也属于热力型不稳定,其诱发原因为边界层发展过程中差的换热性能,恶化换热导致了低密度类气膜。反馈机制为类膜态沸腾和类核态沸腾的交替作用。由于类气膜较厚,振幅较大,振荡不连续,振荡周期也较大。随着压力提高,热力型不稳定减弱。同理,可以对图 3 中热流密度为 500 kW/m² 时的管内壁温度振荡进行解释,即管内壁温度在高热流密度下更靠近拟临界温度,类气膜变薄,致使振荡连续且弱化,出现周期和振幅同时减小的现象。

接着讨论进出口压差波动对不稳定流动的影响。文献[12]表明,进出口压差与振荡声响具有相似的波动性质,可以采用压差波动来定性分析声波不稳定问题。图 8 给出了两种压力下无量纲

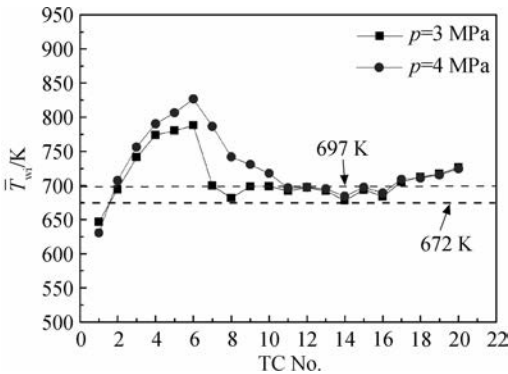


图 7 振荡峰值处平均内壁温度沿流动方向的变化情况
Fig. 7 Variation of the averaged inside-wall temperature at oscillating peak along the flow direction

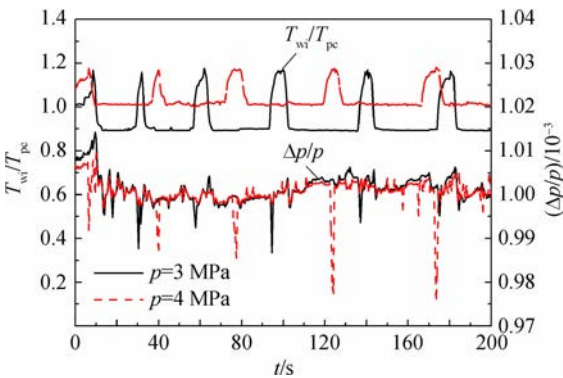


图 8 不同压力下无量纲管内壁温度与进出口压差随时间的变化情况

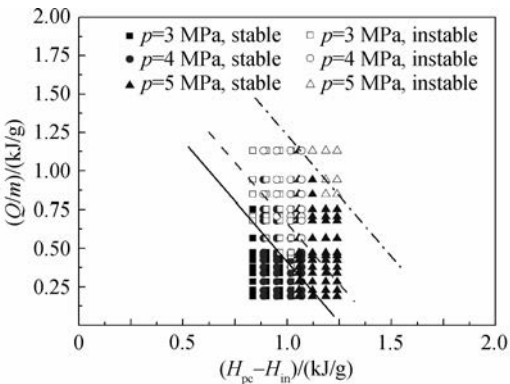


图 9 不同压力下稳定流动与不稳定流动工况的边界

Fig. 8 Variations of the dimensionless inside-wall temperature and inlet-outlet pressure drop with time under different pressures

Fig. 9 Boundaries of the flow stability and flow instability conditions under different pressures

化的管内壁温度与压差随时间的波动情况,热流密度为 400 kW/m²。由图可以看到,进出口压差与管内壁温度剧烈振荡位置具有对应关系,即壁温振荡峰值处近壁面形成的类气膜与压力扰动存在耦合机制。当压缩波通过类气膜时,类气膜厚度减小,传热改善;而膨胀波通过类气膜时,类气膜厚度增大,传热变差,导致声波不稳定现象。声波不稳定是在热力不稳定的基础上由压力扰动引起的,主要表现为压差的大幅波动。声波和热力不稳定耦合形成了热声振荡现象。而热流密度为 500 kW/m²时,两者耦合作用加剧,故振荡声响连续且尖锐。

2.3 不稳定流动边界分析

前述分析表明,不稳定流动的出现与运行压力有关。质量流量和进口温度对不稳定流动也会产生影响^[13]。三者共同决定了不稳定流动的临界热流密度。本节着重获得稳定流动与不稳定流动的边界,以预测不稳定流动现象。实验参数设定:质量流量取 1.5、2.0、2.5、3.0 g/s 四组数据;热流密度取 200、300、400、500、600 kW/m² 五组数据;压力取 3、4、5 MPa 三组数据;进口温度取 313、343、373、403 K 四组数据。共 240 个实验工况。

通过 $H_{pc} - H_{in}$ (拟临界点焓值与进口焓值的差值)和 $Q_{cr}/\dot{m}$ (临界热负荷与质量流量的比值)来描述不稳定流动的边界。RP-3 航空煤油温度与焓值的对应关系见文献[22]。

图 9 给出了稳定流动与不稳定流动工况的边界情况。由图可以看到,三种压力下稳定流动与不稳定流动工况均存在明显的边界,可以通过线性关系描述不稳定流动的临界热负荷,综合压力

的影响,建立了如下关联式:

$$\frac{Q_{cr}}{\dot{m}} = -1.60(H_{pc} - H_{in}) + C \tag{3}$$

式中压力分别为 3、4、5 MPa 时 C 的数值依次为 2.00、2.25、2.82,单位为 kJ/g。该式的适用范围为:1.5 g/s ≤ $\dot{m}$ ≤ 3.0 g/s; 3 MPa ≤ p ≤ 5 MPa; 313 K ≤ T_{in} ≤ 403 K。已知质量流量、进口温度、压力的情况下,通过上式可以得到不稳定流动的临界热负荷,以避免这一现象。

3 结 论

对竖直上升加热圆管内超临界压力 RP-3 航空煤油的不稳定流动开展了实验研究,得到如下结论。

1) 不稳定流动工况中发现了实验管内壁温度和进出口压差的剧烈振荡,这两个参数的异常波动分别与换热不稳定和振荡声响的形成密切相关。

2) 边界层发展过程中传热恶化形成的类气膜是不稳定流动的诱因,存在两种类型的反馈机制:一种机制是类膜态沸腾恶化换热和类核态沸腾强化换热交替形成的热力不稳定;另一种机制是压缩波和膨胀波依次通过类气膜,类气膜厚度交替减小和增大导致的声波不稳定。两种机制的综合作用形成热声振荡现象。

3) 基于质量流量、进口焓值和运行压力建立了不稳定流动的临界热负荷预测关联式,为避免不稳定流动现象提供了判别依据。

参考文献:

[1] ZHANG Lei,ZHANG Ruoling,XIAO Shide,et al. Experimental investigation on heat transfer correlations of *n*-decane under supercritical pressure[J]. International Journal

- of Heat and Mass Transfer, 2013, 64: 393-400.
- [2] ZHANG Chunben, XU Guoqiang, GAO Lin, et al. Experimental investigation on heat transfer of a specific fuel (RP-3) flows through downward tubes at supercritical pressure[J]. Journal of Supercritical Fluids, 2012, 72(9): 90-99.
- [3] HUANG Dan, RUAN Bo, WU Xiaoyu, et al. Experimental study on heat transfer of aviation kerosene in a vertical upward tube at supercritical pressures[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, 23(2): 425-434.
- [4] DANG Guoxin, ZHONG Fengquan, ZHANG Yongjiang, et al. Numerical study of heat transfer deterioration of turbulent supercritical kerosene flow in heated circular tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 85: 1003-1011.
- [5] 王彦红, 李素芬, 东明, 等. 超临界压力航空煤油热声振荡与传热恶化实验研究[J]. 推进技术, 2016, 37(3): 401-410.
- WANG Yanhong, LI Sufen, DONG Ming, et al. Experimental studies on thermoacoustic oscillation and heat transfer deterioration of aviation kerosene under supercritical pressure[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(3): 401-410. (in Chinese)
- [6] HINES W S, WOLF H. Pressure oscillations associated with heat transfer to hydrocarbon fluids at supercritical pressures and temperatures[J]. American Rocket Society Journal, 1962, 32(3): 361-366.
- [7] LINNE D L, MEYER M L, EDWARDS T, et al. Evaluation of heat transfer and thermal stability of supercritical JP-7 fuel[R]. AIAA 97-3041, 1997.
- [8] BRAD H, MICHAEL K. Experimental investigation of heat transfer and flow instabilities in supercritical fuels[R]. AIAA 97-3043, 1997.
- [9] BRAD H, MICHAEL K. Enhancement of heat transfer and elimination of flow oscillations in supercritical fuels[R]. AIAA 98-3759, 1998.
- [10] LIU Zhaohui, BI Qincheng, GUO Yong, 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.
- [11] YANG Zhuqiang, BI Qincheng, LIU Zhaohui, et al. Heat transfer to supercritical pressure hydrocarbons flowing in a horizontal short tube[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 61: 144-152.
- [12] WANG Hui, ZHOU Jin, PAN Yu, et al. Experimental investigation on the characteristics of thermo-acoustic instability in hydrocarbon fuel at supercritical pressures[J]. Acta Astronautica, 2016, 121: 29-38.
- [13] WANG Hui, ZHOU Jin, PAN Yu, et al. Experimental investigation on the onset of thermo-acoustic instability of supercritical hydrocarbon fuel flowing a small-scale channel[J]. Acta Astronautica, 2015, 117: 296-304.
- [14] YAN Junjie, ZHU Yin Hai, 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 and Mass Transfer, 2018, 120: 987-996.
- [15] 严俊杰, 赵然, 闫帅, 等. 超临界压力下竖直圆管内正癸烷对流换热不稳定性实验[J]. 推进技术, 2017, 38(2): 450-456.
- YAN Junjie, ZHAO Ran, YAN Shuai, et al. Experiment on flow and convective heat transfer instability of *n*-decane in a vertical tube at supercritical pressures[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(2): 450-456. (in Chinese)
- [16] ZHOU Weixing, YU Bin, QIN Jiang, 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(1): 34-42.
- [17] 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.
- HU Jiangyu, ZHOU Jin, PAN Yu, et al. Experimental investigation on heat transfer instability of kerosene at supercritical pressure[J]. Physics of Gases, 2017, 2(1): 57-63. (in Chinese)
- [18] DENG Hongwu, ZHANG Chunben, XU Guoqiang, et al. Visualization experiments of a specific fuel flow through quartz-glass tubes under both sub-and supercritical conditions[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(3): 372-380.
- [19] DENG Hongwu, ZHANG Chunben, XU Guoqiang, et al. Density measurements of endothermic hydrocarbon fuel at sub-and supercritical conditions[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2011, 56(6): 2980-2986.
- [20] DENG Hongwu, ZHU Kun, XU Guoqiang, 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(2): 263-268.
- [21] 王彦红. 超临界压力航空煤油热声振荡与传热恶化的机理及预测研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2016.
- WANG Yanhong. Studies on mechanism and prediction of thermo-acoustic oscillation and heat transfer deterioration of aviation kerosene at supercritical pressures[D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [22] 张春本, 邓宏武, 徐国强, 等. 超临界压力下航空煤油 RP-3 焓值的测量及换热研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(2): 331-335.
- ZHANG Chunben, DENG Hongwu, XU Guoqiang, et al. Enthalpy measurement and heat transfer investigation of RP-3 kerosene at supercritical pressure[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(2): 331-335. (in Chinese)