

文章编号:1000-8055(2012)01-0063-06

超临界压力下航空煤油在并联管中 流量分配特性

冉振华, 徐国强, 邓宏武, 张春本, 朱 锐, 黄 文

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 研究了超临界压力下国产航空煤油 RP-3 在竖直并联 U 型管中的流量分配特性, 分析了工质温度、系统压力以及加热热流密度不对称性对流量分配特性的影响规律。其中实验段内、外径分别为 1.8 mm 和 2.2 mm, 实验中质量流量保持为 4 g/s, 系统压力变化范围为 3~5 MPa, 热流密度变化范围为 $q=60\sim240\text{ kW/m}^2$ 。实验结果表明: 较低系统压力下, 等热流密度加热至管路油温达到拟临界温度附近时会诱发支管流量的较大变化, 从而导致并联管系统各支路流量的重新分配; 加热不均对支路流量的影响非常显著; 另外, 提高系统压力可以有效抑制并联管系统中各支路流量分配失衡, 增强系统的稳定性。

关 键 词: 超临界; RP-3; 并联管; 流量分配; 稳定性

中图分类号: V312

文献标志码: A

Characteristics of flow distribution of aviation kerosene in parallel pipes under supercritical pressure

RAN Zhen-hua, XU Guo-qiang, DENG Hong-wu,

ZHANG Chun-ben, ZHU Kun, HUANG Wen

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China)

Abstract: Flow distribution characteristics of China No. 3 kerosene (RP-3) in vertical parallel U-turn tubes were experimentally investigated under supercritical pressures. Based on the experimental results, the effects of temperature, pressure and asymmetrical heat flux to the flow distribution characteristics of the RP-3 were analyzed. In the experiments, the inner and outer diameters of the test tube are 1.8 mm and 2.2 mm respectively; the mass flow rate is maintained at 4 g/s under the pressure from 3 to 5 MPa, and the heat flux changes from 60 to 240 kW/m². The test results indicate that static unsteady phenomenon will be induced when fuel temperature is close to its pseudo-critical point under the lower pressure, which leads to flow imbalance and flow redistribution between the two tubes. In addition, the mass flow in the branch tube is significantly affected by the non-uniformity of heat flux, and the system stability can be improved effectively by the increase of pressure and which will inhibit the flow distribution differences in the parallel pipes.

Key words: supercritical; RP-3; parallel pipes; flow distribution; stability

收稿日期: 2011-03-21; **修订日期:** 2011-07-20

基金项目: 国家自然科学基金 (50676005)

作者简介: 冉振华 (1987—), 男, 山西晋中人, 硕士生, 主要从事超临界碳氢燃料流动换热研究。

为满足航空发动机涡轮前温度和增压比持续提高的需求,在继续研究新型冷却结构的同时,探寻提高冷却空气冷却品质的新方法是极为必要的.通过在航空发动机上安装空油换热器,利用高热容的航空煤油预先将用来冷却高温部件的冷却空气进行冷却^[1],既可以解决航空发动机日益突出的冷却问题,又有利于燃料的雾化和燃烧^[2-3],具有很大的发展前景.研究表明:国产航空煤油 RP-3 的临界压力为 2.39 MPa^[4],而航空发动机供油系统压力为 5 MPa,普遍高于其临界压力.同时,随着热负荷的增加,换热器中航空煤油的温度将超过临界温度而进入超临界状态.在拟临界点附近,流体的物理性质发生较大变化,此时换热特性和流动特性将互相影响,导致换热器并联支路中的流量发生变化,若流量偏差过大,有可能造成换热管局部超温,引发安全事故,因此研究超临界条件下航空煤油在并联管内的流量分配规律具有重要意义.

国内外以水和二氧化碳为工质对并联管中多相流流动不稳定性及流量分配特性做了大量的研究,并且已取得许多成果^[5-9],然而对于超临界状态下吸热型碳氢燃料在并联管内的流量分配的可见报道相对较少.本文结合国内外已有的研究成果,在北京航空航天大学超临界流动换热实验台上开展相关研究,考察了不同压力、不同热流密度

下并联竖直 U 型管中国产航空煤油 RP-3 的流量分配情况.

1 实验设备参数及处理方法

1.1 实验台介绍

本实验在北京航空航天大学超临界流动换热实验台上进行.实验系统简图如图 1 所示.实验中,利用柱塞泵,将储油罐中的 RP-3 航空煤油压力提高至设定值,并以一定的质量流量供给实验段.柱塞泵出口处安装有脉冲阻尼器,以消除泵的工作频率对系统的影响,稳定系统压力.煤油通过流量计之后,依次进入预热段、实验段,最后经由水冷套管式冷却器流入废油收集箱.实验系统的总质量流量由安装在预热段前的针形流量调节阀控制,系统压力通过调节系统出口处的背压阀控制,预热段与实验段均采用交流电利用管电阻直接加热.

实验段采用不锈钢管(U 型管,总长 $L=1900$ mm,有效加热长度 $L_{\text{heat}}=1800$ mm,内径 $D_{\text{in}}=1.8$ mm,外径 $D_{\text{out}}=2.2$ mm,弯曲段直径为 50 mm),铜电极的安装位置距进、出口分别为 50 mm,作为绝热稳定段.实验段用 Aspen 纳能材料(导热系数为 $0.012 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)有效保温.各支路煤油的进、出口温度分别通过安装在实验段进、出口的 K 型铠装热电偶(图 1 中 TC0,0', TC16,16')进

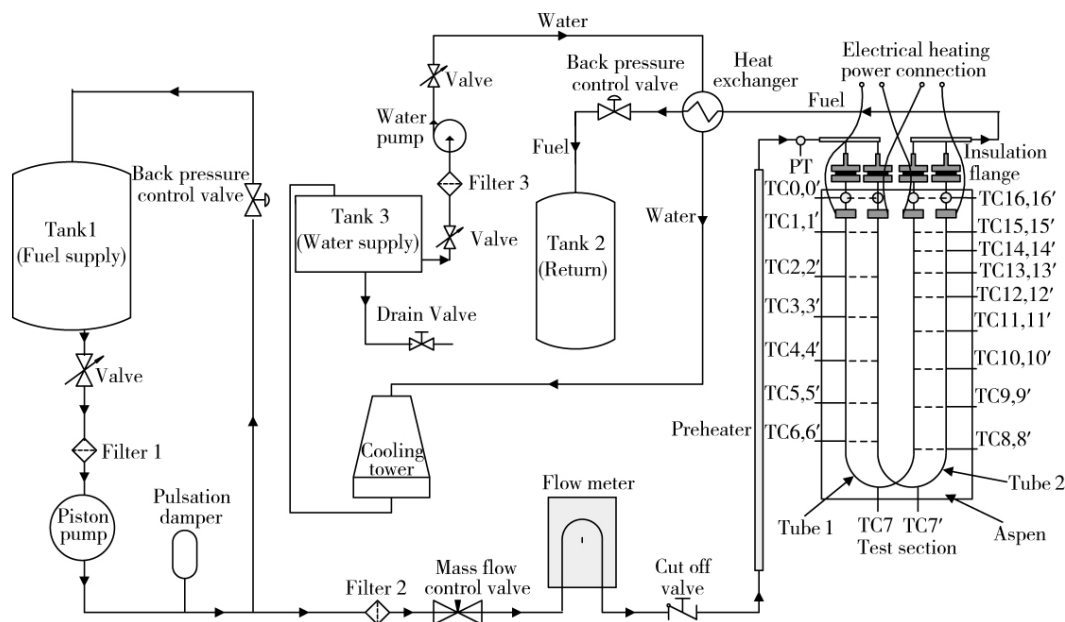


图 1 实验系统简化图

Fig. 1 Schematic of the experiment system

行测量. 实验段外表面,非等距地布置 15 对 0.1 mm 的 K 型热电偶,用于监测实验段外壁温;实验段压降采用 ROSEMOUNT-3051 型差压变送传感器测量;系统的质量流量用 DMF-1 型科里奥利质量流量计测量. 各仪器测量精度如表 1 所示.

表 1 各测量仪器精度
Table 1 Measuring accuracy

测量仪器	工作范围	测量精度
DMF 型科里奥利质量流量计	2~20 g/s	±1.5%
K 型铠装热电偶(油温)/K	0~1000	±0.5
K 型热电偶(壁温)/K	0~1000	±0.5
XST/C-H1VA1VON 电压表/V	0~100	±0.2
XSP1C/A-HiT1A1SO 电流表/A	0~100	±0.2

1.2 支路流量测量

因实验段压降较小,各支路中接入质量流量计将对实验段的流阻等带来较大影响,本文采用了如下方法实现了对支路的流量间接测量:

$$q_m = \frac{U \cdot I - Q_{loss}}{H_{out} - H_{in}} \tag{1}$$

式中

- q_m ——质量流量, g/s;
- U ——实验段的加热电压, V;
- I ——实验段的电流, A;
- Q_{loss} ——实验段热损失(由热损失实验测得), J;
- H_{in}, H_{out} ——RP-3 航空煤油在进、出口温度下的焓值^[10], J.

为了确保流量测量的准确性,对该方法的可靠性进行了实验验证.

图 2 为流量计直接测量结果与计算结果的对比. 工况 1, $q_m=2\text{ g/s}$, $T_{in}=400\text{ K}$, $T_{out}=573\text{ K}$; 工况 2, $q_m=2\text{ g/s}$, $T_{in}=400\text{ K}$, $T_{out}=623\text{ K}$; 工况 3, $q_m=2\text{ g/s}$, $T_{in}=400\text{ K}$, $T_{out}=648\text{ K}$; 工况 4, $q_m=2\text{ g/s}$, $T_{in}=400\text{ K}$, $T_{out}=673\text{ K}$; 工况 5, $q_m=2\text{ g/s}$, $T_{in}=400\text{ K}$, $T_{out}=698\text{ K}$; 工况 6, $q_m=2\text{ g/s}$, $T_{in}=400\text{ K}$, $T_{out}=723\text{ K}$; 工况 7, $q_m=3\text{ g/s}$, $T_{in}=400\text{ K}$, $T_{out}=698\text{ K}$; 工况 8, $q_m=4\text{ g/s}$, $T_{in}=400\text{ K}$, $T_{out}=698\text{ K}$. 在各种不同的工况下,两者所得的结果相差很小,其最大绝对误差为 0.05 g/s,最大相对误差为 2.6%.

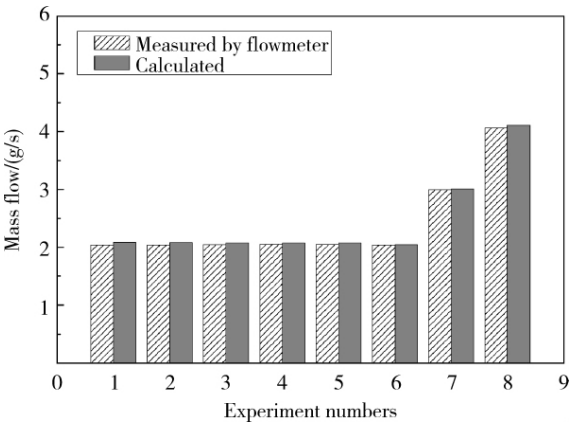


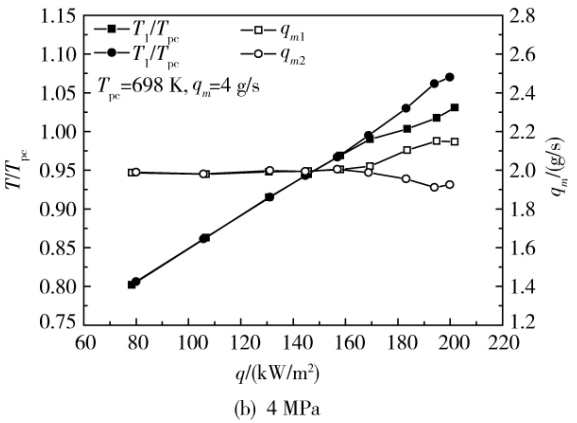
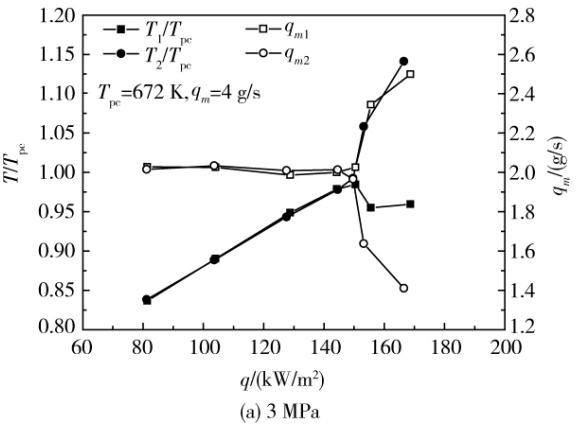
图 2 流量计直接测量结果与计算结果的对比
Fig. 2 Comparison of the calculated and experimental mass flow rate

2 实验结果及分析

2.1 工质温度对流量分配的影响

图 3 为两支路在等热流密度加热条件下,实验段两支路中质量流量及出口温度随热流密度的变化. 实验中保证实验段总质量流量维持 4 g/s 不变(图 3 中 T_{pc} 为对应压力下航空煤油 RP-3 的拟临界温度).

由图 3 可知,在 3 MPa, 4 MPa 压力下,随着加



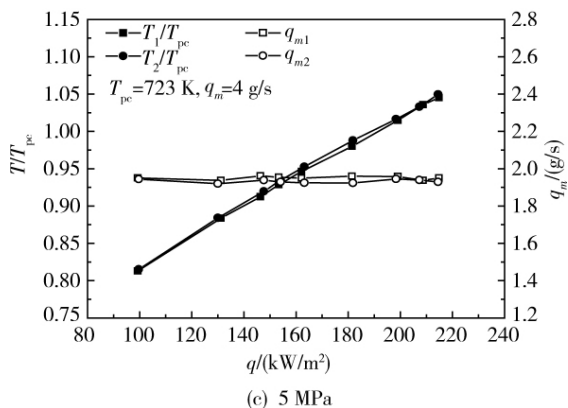


图 3 等热流密度下各支路质量流量及出口温度随热流密度的变化

Fig. 3 Mass flow and outlet temperature of the branch tubes variation with heat flux under equal heating

热流密度的不断增大, 实验系统会发生静态不稳定性, 实验段两支路中流量逐渐发生偏差, 且随着加热热流密度的增大, 偏差进一步加剧, 但变化趋缓。

随着加热热流密度的增大, 两支路中的航空煤油温度同步升高, 在两支路中煤油温度达到拟临界温度附近时, 由于拟临界点附近物性的大幅变化^[11-12], 引起两个支路中煤油阻力特性的变化^[13]。由于轻微的外界扰动, 使得某一支路中油温率先达到拟临界点, 导致该支路中阻力突然增大, 引起该支路流量减小以抑制该扰动对系统的影响, 在热流密度不变的情况下, 流量的减小将使得该支路燃油温度继续升高, 使得管内流阻进一步增大, 从而导致该支路流量的继续减小。在这里需要强调的是尽管流量的减小在一定程度上会使得该支路的流阻减小, 但是当燃油温度超过拟临界点后, 燃油在管内的流阻系数约与温度的 1.38 次方成正比^[13], 温度升高引起的流阻增大将超过流量减小所引起的流阻减小, 因此该支路整体表现为流阻的增加。对于整个系统, 由于管内压差的增量仅为系统压力的 0.8%, 因此不会导致系统总流量出现较大变化, 根据质量守恒原理可知并联管系统中一支路流量的减小必然引起另一支路流量的增加, 流量的增加一方面会使得该支路的阻力增大; 另一方面在加热热流密度不变的情况下会使得该支路的油温降低, 但前期的研究结果表明, 燃油流阻在拟临界温度点前随温度变化很小^[13], 因此该支路最终仍表现为流阻的增加, 直到两支路流阻重新达到平衡。

2.2 加热不对称性对流量分配的影响

图 4 为 3 MPa 压力下, 两支路不等热流密度条件下, 实验段各支路出口温度变化情况, 横坐标为两支路热流密度之比。实验段总质量流量维持 4 g/s 不变, 实验中保持支路 1 加热热流密度 150 kW/m² 不变, 实验开始时支路 1 的出口无量纲油温 T/T_{pc} 为 1.041, 实验中不断增大支路 2 的热流密度以研究非等热流密度下并联管系统中的流量分配特性。

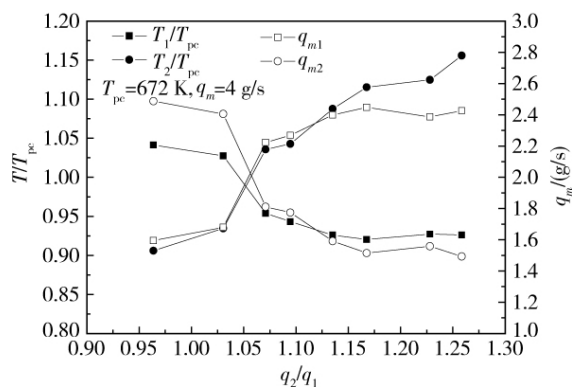


图 4 3 MPa 不等热流密度下各支路质量流量及出口温度随 q_1/q_2 的变化

Fig. 4 Mass flow and outlet temperature of the branch tubes versus q_2/q_1 at 3 MPa

从图 4 中可以看出, 由于实验开始时支路 1 的燃油温度已经超过此压力下的拟临界温度, 导致起始时支路 1 的流量小于支路 2 的流量。随着支路 2 加热热流密度的增加, 支路 2 的出口燃油温度会不断升高, 当燃油温度接近其拟临界点时, 流阻的快速增长使得该支路流量减小, 从而导致支路 1 流量的增加, 并进一步导致支路 1 油温的降低, 当两支路出口油温超过拟临界温度点时, 两支路的流量发生逆转, 随着支路 2 加热热流密度的增加, 该现象进一步加剧。

2.3 系统压力对流量分配的影响

从图 3 中还可以看出等热流密度下系统压力对流量分配特性的影响, 3 MPa 时, 并联管流量分配开始时对应的煤油出口温度约为 658 K; 而 4 MPa 时, 并联管流量分配开始出现偏差所对应的出口温度为 680 K。另外, 4 MPa 时, 实验段中的流量变化幅度也远小于 3 MPa 时的变化幅度, 在系统压力达到 5 MPa 时, 随着加热热流密度的提高, 实验支路 1 和 2 的出口温度同步平稳升高, 各实

验支路的流量没有发生大幅改变。

图 5 进一步给出了 4 MPa, 5 MPa 压力下不等加热热流密度对并联管各支路流量分配特性的影响。对比图 4、图 5 可知,随着压力的增加,两支路流量相交点后移,且变化幅度减小,增大压力可以增强系统对支路受热不均的适应能力。

实验结果表明,压力的增大会使并联管流量分配偏差开始出现时所对应的煤油出口温度升高,并且使支路流量的变化幅度减小,从而有效抑制并联管流量分配失衡,对系统有稳定作用:系统压力越高,系统越稳定,流量分配越均匀。

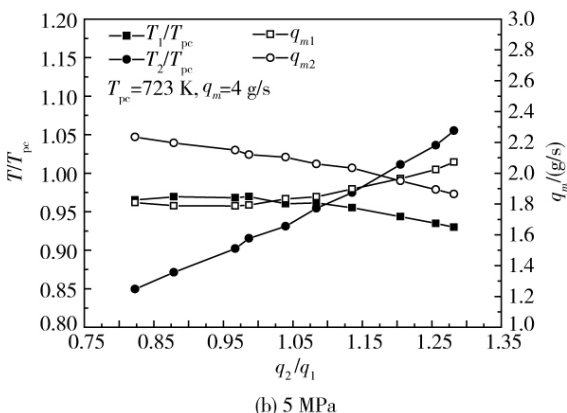
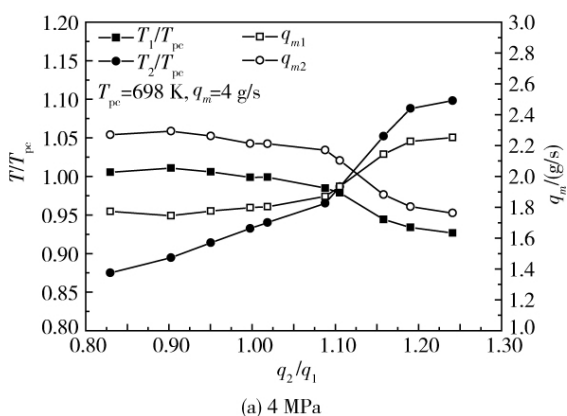


图 5 不等热流密度下各支路质量流量及出口温度随 q_1/q_2 的变化

Fig. 5 Mass flow and outlet temperature of the branch tubes change with q_1/q_2 at 4 MPa and 5 MPa

3 结 论

本文对超临界压力下竖直并联 U 型管中航空煤油流量分配特性进行了探索研究,讨论了温度、系统压力以及加热热流密度的不对称性对并联管流量分配的影响。得到了如下结论:

1) 低系统压力下,等热流密度加热至管路油温达到拟临界温度附近时,并联管系统各支路将发生流量分配不均现象,随着温度的升高,支管间的流量差异逐渐增大并趋于稳定。

2) 热流密度不对称性对系统分配特性有一定的影响,拟临界温度附近,加热不均对支路流量的影响十分显著。

3) 增加系统压力可以有效抑制并联管流量分配失衡,同时,系统压力的提高还可以有效降低热流密度不均匀性对并联管系统流量分配失衡的影响,提高系统稳定性。

参考文献:

- [1] Bruening G B, Chang W S. Cooled cooling air systems for turbine thermal management[R]. ASME Paper 99-GT-14, 1999.
- [2] Jackson K, Corporan E, Buckley P, et al. Test results of an endothermic fuel reactor[R]. AIAA 95-6028, 1995.
- [3] Lander H R, Nixon A C. Endothermic fuels for high Mach vehicles[J]. American Chemical Society, Division of Petroleum, 1987, 32(2): 504-511.
- [4] 孙青梅, 米镇涛, 张香文. 吸热型碳氢燃料 RP-3 仿 JP-7 临界性质(t_c, p_c)的测定[J]. 燃料化学学报, 2006, 34(4): 466-470.
SUN Qingmei, MI Zhentao, ZHANG Xiangwen. Determination of critical properties(t_c, p_c) of endothermic hydrocarbon fuels RP-3 and simulated JP-7[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, 34(4): 466-470. (in Chinese)
- [5] Boure J A, Bergles A E, Tong L S. Review of two-phase flow instability[J]. Nuclear Engineering and Design, 1973, 25(2): 165-192.
- [6] Shen P I. The effect of friction on flow distribution in dividing and combining flow manifolds[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1992, 114(1): 121-123.
- [7] 陈听宽, 荆建刚, 罗毓珊. 并联管两相流不稳定性研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(1): 99-102.
CHEN Tingkuan, JING Jiangang, LUO Yushan. An investigation on the two-phase flow instability in parallel pipes[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(1): 99-102. (in Chinese)
- [8] 韦晓丽, 缪正清. Z 型和 U 型集箱并联管组流动特性的实验研究[J]. 动力工程, 2008, 28(4): 514-518.
WEI Xiaoli, MIAO Zhengqing. Experimental study of flow characteristics in parallel tube set systems with type-Z and type-U headers[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(4): 514-518. (in Chinese)
- [9] 朱玉琴, 毕勤成, 陈听宽. 超临界压力下水冷壁中间集箱分配特性的研究[J]. 热能动力工程, 2006, 21(3): 299-302.
ZHU Yuqin, BI Qincheng, CHEN Tingkuan. An investigation on the flow distribution characteristics of a water-wall intermediate header at a supercritical pressure[J]. Journal

- of Engineering for Thermal Energy and Power, 2006, 21 (3):299-302. (in Chinese)
- [10] 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. 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)
- [11] 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 & Engineering Data, 2011, 56(6):2980-2986.
- [12] ZHONG Fengquan, FAN Xuejun, YU Gong, et al. Heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2009, 23(3):543-550.
- [13] 黄文, 邓宏武, 徐国强, 等. U 型管内超临界压力航空煤油压降特性[J]. 航空动力学报, 2011, 26(3):582-587.
- HUANG Wen, DENG Hongwu, XU Guoqiang, et al. Pressure drop characteristics of supercritical aviation kerosene in U-turn tube[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26 (3):582-587. (in Chinese)