

文章编号:1000-8055(2011)03-0582-06

U 型管内超临界压力航空煤油压降特性

黄 文, 邓宏武, 徐国强, 朱 锟

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 研究了超临界状态下航空煤油 RP-3 在 U 型管内的压降特性, 分析了温度和压力对于流动压降的影响规律. 实验结果表明: 当煤油的出口温度低于临界温度时, 压降随压力的增大而增大, 随温度的升高变化很小; 当煤油的出口温度大于临界温度时, 压降随压力的升高而减小, 随温度的升高而增大. 在拟临界点附近, 压降随温度的变化斜率突然增大. 另外, 基于实验结果, 提出了一种用压力和温度修正的摩擦阻力系数关联式, 用于预测超临界压力状态下煤油在 U 型管中的平均摩擦压降.

关 键 词: 超临界压力; 航空煤油; 压降; U 型管; 流动阻力

中图分类号: V312

文献标识码: A

Pressure drop characteristics of supercritical aviation kerosene in U-turn tube

HUANG Wen, DENG Hong-wu, XU Guo-qiang, ZHU Kun

(School of Jet Propulsion,

Beijing University Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The flowing characteristics of aviation kerosene at supercritical pressure flowing through a U-turn tube were investigated. The pressure and temperature were analyzed to evaluate their effectiveness on the pressure drop. The results indicate that, when the temperature of the fuel at the outlet is below the critical temperature, the pressure drop does not change with the increase of the temperature of the fuel, but increases with the rising pressure; when it is above the critical temperature, the pressure drop increases with the increasing temperature, and decreases with the increasing of pressure. The slope of pressure drop with temperature increases near the pseudo-critical temperature. Furthermore, a relation-formal was proposed to predict the pressure drop when hydrocarbon fuel flowed through a U-turn tube at supercritical pressure.

Key words: supercritical pressure; aviation kerosene; pressure drop; U-turn tube; flow resistance

随着对航空发动机性能要求的提高,一方面,要求提高发动机的涡轮前温度,这大大加重了高温部件的冷却任务;另一方面,压气机的增压比也相应提高,这又导致了压气机出口引气冷却品质的降低,给热端部件的可靠运行带来了极大的挑战.在冷气用量和冷却结构都无法大幅度变化的

前提下,国内外许多学者提出了空-油换热器设计方案,利用高热沉的航空煤油对冷却空气进行冷却,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.随着热负荷的增加,航空煤油的温度将超过临界温度而达到超临界状态.在流体的临界点附近,流体的物理性质会发生

收稿日期:2010-03-11; 修订日期:2010-05-19

基金项目:国家自然科学基金(50676005)

作者简介:黄文(1986—),男,浙江青田人,硕士生,主要从事超临界燃料流动与换热方面研究.

剧烈的变化^[1],这导致了超临界流体在管内流动特性的变化,对航空发动机燃油系统的运行带来影响.为了保证燃油系统的正常运行,须对航空煤油在超临界状态下的流动特性进行研究.

所谓超临界状态是指流体的压力和温度均超过其临界压力和临界温度的状态.从物理性质上来讲,超临界流体具备液态和气态的双重特性,即密度高于气体,接近液体;黏度与气体相似,比液体小;扩散系数接近于气体,大约为液体的10~100倍,因而它具有较好的流动性和传输特性.对于超临界流体在管内流动阻力的研究,国内外学者已经做了许多工作^[2-12],并取得了许多成果,但是这些研究大都是以单一介质作为研究对象,而对于像煤油这样的多组分介质的研究却很少涉及.由于煤油的多组分特性,使其在超临界状态下的物理特性较单质更为复杂,从而使其换热和流动特性也有所变化.另外,目前关于超临界流体压降特性的研究多针对直圆管,而对于U型管或“蛇”型管的研究很少.实际上,U型管或“蛇”型管相对于直管而言,具有更好的紧凑性和换热特性,更符合空-油换热器的设计标准.因此研究超临界燃料在U型管中的压降特性,对于以后空-油换热器的设计是有必要的.本文以煤油作为实验介质,通过改变实验段压力以及出口温度,监测系统压降的变化情况,研究了压力和温度对于系统流动阻力的影响规律.

1 实验装置

图1所示为实验装置示意图.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,并以一定的质量流速供给实验段;在柱塞泵出口处,安装有脉冲阻尼器,以消除泵的工作频率对系统的影响,并可以起到稳定系统压力的作用;煤油通过流量计之后,先经过预热段使温度达到一定值,再进入实验段;从实验段出来的高温煤油通过冷凝器,使温度冷却至常温后,流入废油收集箱.为了保证系统安全,设置了安全旁路,当系统压力过高,旁路就会自动开启泄压.实验系统的质量流速是通过安装在预热段前的针形流量调节阀控制的,而系统压力则是通过调节系统出口处的背压阀控制的.

图2为实验段示意图.如图所示,实验段为U型不锈钢管($L=2100\text{ mm}$,内径 $D_{\text{in}}=1.8\text{ mm}$,外径 $D_{\text{out}}=2.2\text{ mm}$,弯曲段直径为 50 mm),其中有效加热段长度为 2000 mm ,进、出口均留 50 mm 作为绝热稳定段;实验段用Aspen绝热材料(其导热系数为 $0.012\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)包裹,以保证绝热效果.煤油的进、出口温度分别通过安装在实验段进、出口的K型铠装热电偶进行测量;实验段外表面,非等距(热电偶的位置如图2所示)布置25对 0.1 mm 的镍硅-镍铬热电偶,用于监测实验段外壁温;实验段压降采用ROSEMOUNT-3051型

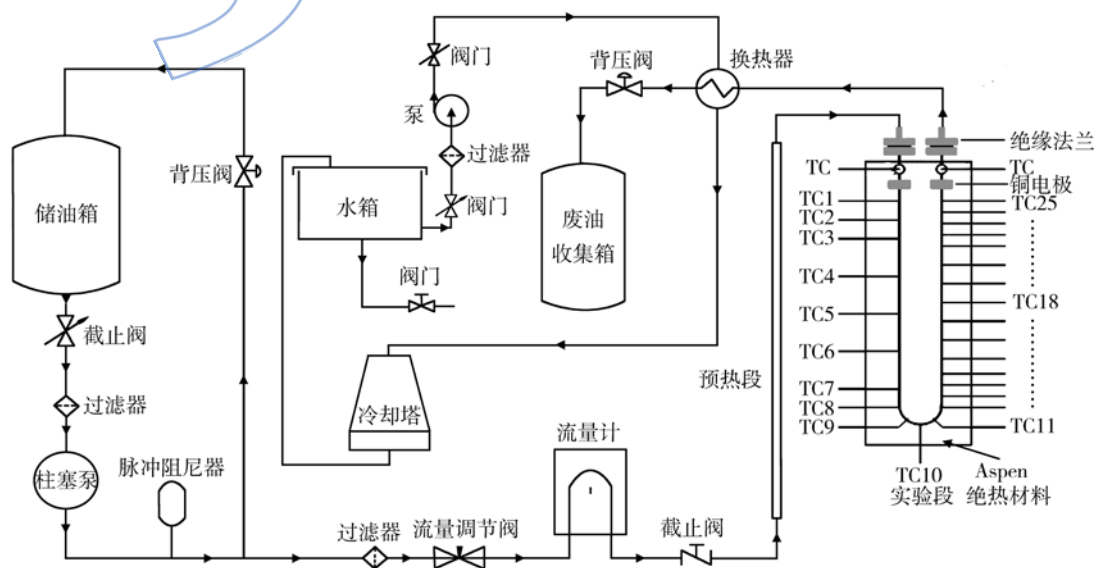


图1 实验系统简化图

Fig.1 Schematic of the supercritical fluid system

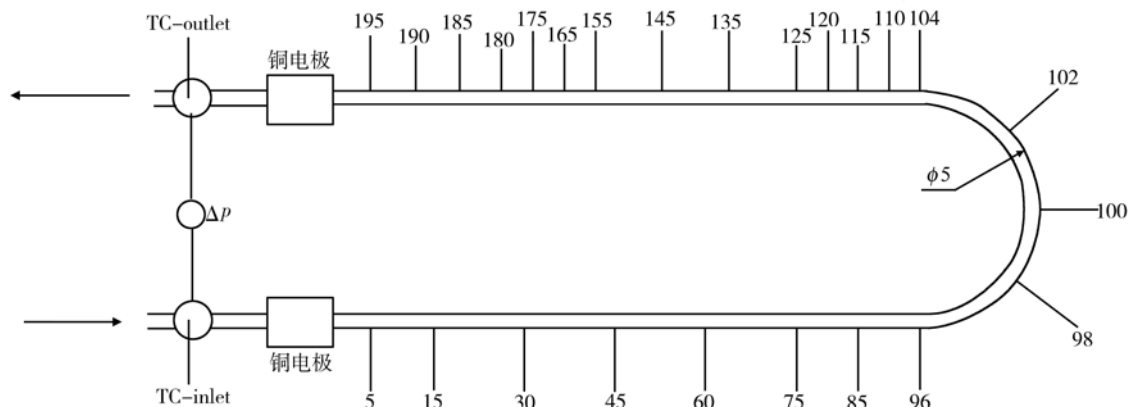


图2 实验段示意图(单位:cm)

Fig. 2 Schematic of the test section (unit:cm)

差压变送传感器测量;系统的质量流速用 DMF-1 型科里奥利质量流量计测量. 各仪器的测量精度如表 1 所示.

表 1 各测量仪器精度

Table 1 Accuracy of measuring instruments

测量仪器	测量精度/%
DMF-1 型科里奥利质量流量计	±0.3
K 型铠装热电偶	±0.6
ROSEMOUNT-3051 型差压变送传感器	±0.15

2 实验结果分析

实验测得的压降是指在超临界状态下 RP-3 航空煤油在 U 型管内流动时的总压降

$$\Delta p = \Delta p_f + \Delta p_g + \Delta p_a + \Delta p_l \quad (1)$$

式中 Δp_f 为加热情况下的摩擦阻力压降; Δp_g 是由于重力作用产生的压降; Δp_a 是由于流体流动加速产生的压降; Δp_l 是由于局部流动阻塞产生的压降.

本文对不同压力 and 不同温度条件下的压降特性展开了研究.

2.1 系统压力对实验段压降的影响

图 3 给出了系统压力分别为 3, 4, 5 MPa 和 6 MPa, 质量流速为 3 g/s, 进口温度为 320 K 的条件下, 实验段压降随出口温度的变化情况.

从图 3 中可以看到, 当出口温度低于 RP-3 航空煤油的临界温度时, 在相同的出口温度下, 压降随着压力的升高而升高. 流体的流阻主要受到流体黏性和流体流速的影响. 当煤油温度低于临界温度时, 煤油呈液态特性, 其密度随压力的变化

可以忽略, 如图 4 所示, 图中 ρ_0 , μ_0 分别为 3 MPa 下的煤油密度和黏度. 从图中可以看到, 压力由 3 MPa 升高到 7 MPa, 在 470 K 时, 其密度增大了 1%, 而其黏度则增大了 7%; 在 600 K 时, 密度增大了 4%, 而黏度则升高了 17%. 因此, 压降会随

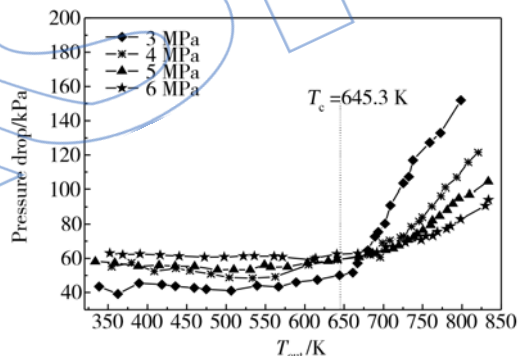


图3 系统压力对压降的影响

Fig. 3 Effects of pressure on pressure drop

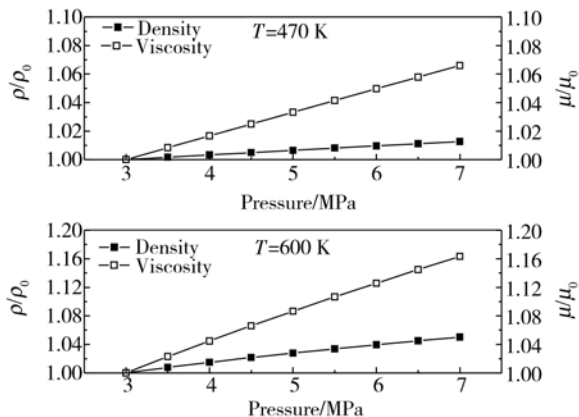


图4 压力对 RP-3 物性的影响

Fig. 4 Effects of pressure on physical characteristics of RP-3

着压力的升高而增大。

2.2 温度对压降的影响

图5、图6分别是系统压力为3,4 MPa下,压降随煤油出口温度的变化情况。

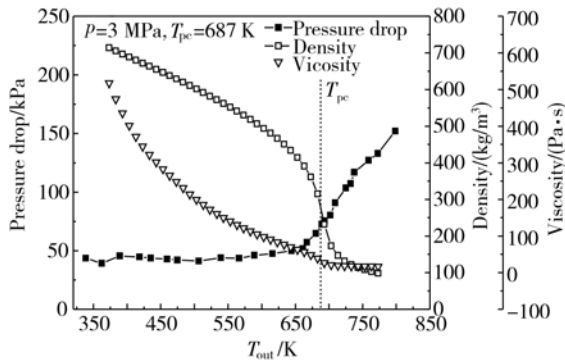


图5 3 MPa下,压降、密度和黏度随出口温度的变化
Fig. 5 Effects of the temperature on pressure drop, density and viscosity at 3 MPa

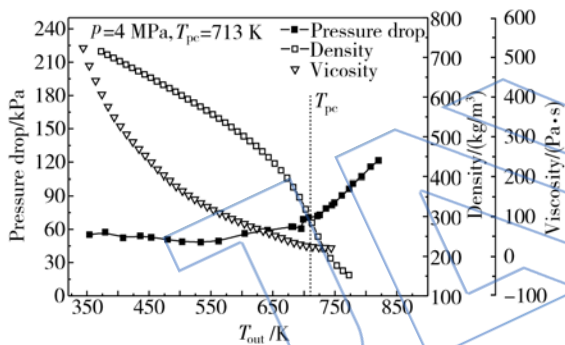


图6 4 MPa下,压降、密度和黏度随出口温度的变化
Fig. 6 Effects of the temperature on pressure drop, density and viscosity at 4 MPa

实验结果表明,当煤油的出口温度低于相应压力下的拟临界温度 T_{pc} (一定压力下,比定压热容达到最大时的温度)时,系统压降随温度的变化很小.这主要是因为随着温度的升高,一方面,煤油的密度下降,导致管内流体流速增大且管壁换热增强;另一方面,煤油的黏度也相应下降.在这种情况下,由于黏性减小所引起的流阻减小与由于流速增大以及换热增强所引起的流阻增大达到了平衡。

当煤油的温度高于相应压力下的拟临界温度时,系统压降随温度的升高而急剧升高,如图5、图6所示.这是因为在拟临界温度附近,煤油密度的下降程度比较剧烈,而黏性的变化则相对平缓.由密度变化所引起的加速压降和流速增大所引起

的磨擦压降以及由于换热增强所引起摩擦阻力压降增大的作用将明显超过由于黏性减小所引起的摩擦阻力减小.因此,其共同作用将使压降升高。

淮秀兰等^[4]测量了二氧化碳在跨临界流动状态下压降随温度的变化情况.实验表明,在拟临界温度点附近,压降随温度的变化斜率突然增大;当流体温度远离拟临界温度时,压降的变化斜率又趋于平缓.这一结论与本文是一致的,但是本文中煤油的比对温度 (T_f/T_c) 不是很高,因此没有观测到斜率趋于平缓的现象。

2.3 摩擦阻力系数关联式拟合

对于管内流体的摩擦阻力系数,可以采用下式进行计算:

$$f = \Delta p_f \frac{2\rho D}{G^2 L} \quad (2)$$

其中 G 为单位面积质量流量 ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); L 为实验段总长 (m); D 为管道内径 (m); ρ 为煤油在实验段出口处的密度 (kg/m^3)。

在本实验中

$$\Delta p_f = \Delta p - \Delta p_g - \Delta p_a - \Delta p_l \quad (3)$$

Δp_g 是由于重力作用产生的压降^[11]

$$\Delta p_g = g \left(\frac{H_{in} \rho_{in} + H_{out} \rho_{out}}{H_{in} + H_{out}} \right) S \quad (4)$$

式中 ρ_{in}, ρ_{out} 分别为煤油的进、出口密度; H_{in}, H_{out} 为煤油在进出口的焓值; S 为差压变送器两个测点的高度差.本实验中,差压变送器的两个测点基本处于同一水平面,因此重力压差的影响可以忽略。

Δp_a 是由于流体流动加速产生的压降

$$\Delta p_a = G^2 \left(\frac{1}{\rho_{out}} - \frac{1}{\rho_{in}} \right) \quad (5)$$

Δp_l 是由于局部流动阻塞产生的压降

$$\Delta p_l = \xi \left(\frac{G^2}{2\rho} \right) \quad (6)$$

式中 ξ 为局部阻力系数,对于弯曲段,其计算的经验公式为

$$\xi = \left(\frac{\phi}{90} \right) \left[0.131 + 0.159 \left(\frac{D}{r} \right)^{3.5} \right] \quad (7)$$

其中 ϕ 为弯管弯曲的角度; r 为弯管中线的曲率半径。

对于单相介质,可以用 Filonenk 关联式来计算其摩擦阻力系数

$$f_0 = (1.82 \times \lg Re - 1.64)^{-2} \quad (8)$$

式中 Re 为雷诺数.在本研究中,以煤油在实验段出口处的温度作为定性温度。

由于物质在超临界状态下,尤其是在临界点附近,其物性会发生剧烈的变化.因此,该关联式对于超临界状态下流体压降的预测会产生较大误差,计算值普遍低于实验测量值,如图7所示.对此,Petukhov^[13]对Filonenk关联式提出了修正来计算变物性摩擦阻力

$$f = f_0 \left[\frac{1}{6} \left(7 - \frac{\mu_b}{\mu_w} \right) \right] \quad (9)$$

式中 μ_b, μ_w 分别为煤油主流温度下的黏度和靠近壁面处煤油的黏度.如图7所示,经过修正,计算结果的误差得到了一定的改善,大部分误差都在 $\pm 20\%$ 之间.

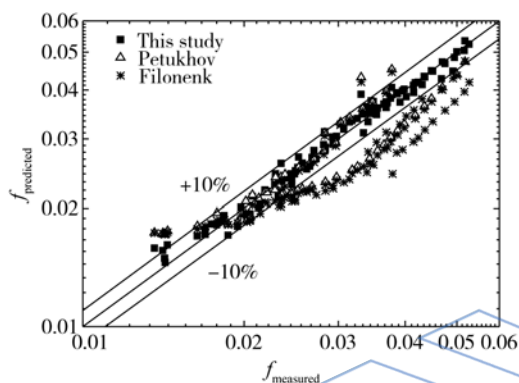


图7 实验结果与修正关联式计算结果的比较

Fig. 7 Comparison between the measured values and calculated values

在实验结果的基础上,本文提出了另一种修正方案.实验结果表明,煤油物性的变化是导致流动阻力特性发生变化的主要原因,而物性又与温度和压力有密切联系,基于这一原因,本文提出了一种用温度和压力修正摩擦阻力系数的方法

$$f = a T_i^b p_i^c f_0 \quad (10)$$

式中 f_0 为 Filonenk 关联式计算所得; p_i, T_i 则为比对压力和比对温度,分别为

$$\begin{cases} p_i = \frac{p}{p_c} \\ T_i = \frac{T}{T_c} \end{cases} \quad (11)$$

p_c, T_c 分别为 RP-3 航空煤油的临界压力和临界温度; p 为实验段压力; T 则为实验段出口的煤油温度, a, b, c 为经验常数

$$\begin{cases} a = 0.94, b = -0.26, c = 0.46 & (T_i \leq 1) \\ a = 0.98, b = 1.38, c = 0.44 & (T_i \geq 1) \end{cases}$$

其计算结果与实验值之间有较好的一致性,其中 90% 的实验数据都在误差为 $\pm 10\%$ 以内,如

图7所示.但是该关联式具有一定的局限性,即只针对流体在超临界压力下流过 U 型管的情况.

2.4 误差分析

由公式(2)可得

$$\epsilon_f = \sqrt{(\epsilon_{\Delta p_f})^2 + 2(\epsilon_G)^2 + (\epsilon_L)^2 + (\epsilon_D)^2 + (\epsilon_\rho)^2} \quad (12)$$

其中 ϵ_f 为摩擦阻力系数的不确定度; ϵ_G 为 G 的不确定度,为 0.3%; ϵ_L 为管长不确定度,约为 0.05%; ϵ_D 为管道内径的不确定度,取 2%; ϵ_ρ 为密度的不确定度,由于油温测量的误差,会给密度的计算带来不确定度,取 2%; $\epsilon_{\Delta p_f}$ 为摩擦阻力压降的不确定度.由公式(3)得

$$\epsilon_{\Delta p_f} = \sqrt{(\epsilon_{\Delta p})^2 + (\epsilon_{\Delta p_a})^2 + (\epsilon_{\Delta p_l})^2} \quad (13)$$

其中 $\epsilon_{\Delta p}$ 为总压降测量不确定度,为 0.15%; $\epsilon_{\Delta p_l}$ 为局部压力损失的不确定度,实验结果表明,由于接口处突扩、突缩所引起的局部压力损失最大为 2 kPa,而实验最小压降为 40 kPa,因此,其不确定度约为 5%; $\epsilon_{\Delta p_a}$ 为热加速压降不确定度,根据公式(5),可以计算得其不确定度约为 3%.由公式(13)得总压降的不确定度为 5.8%.

将上述值代入式(12),计算得实验相对误差约为 6.5% 左右.可以判定本实验得到的数据是可靠的.

3 结论

本文通过实验,研究了超临界航空煤油 RP-3 在 U 型管中的流动阻力特性,得到了压力和煤油出口温度对系统压降的影响规律.

1) 当煤油出口温度低于临界温度时,系统压降随着压力的升高而增大,但随温度的升高变化很小.

2) 当煤油的出口温度高于临界温度时,系统压降随压力的增大而减小,随着温度的升高而急剧增大.

3) 在煤油的拟临界温度附近,压降随温度的变化斜率会突然增大,而增大的幅度随着压力的升高而减小.

4) 本文用压力和温度对摩擦阻力系数关联式进行了修正,计算结果与实验结果相比,具有较好的一致性.

参考文献:

- [1] 范启明,米镇涛,于燕,等.高超音速推进用吸热型烃类燃料的热稳定性研究 I:热氧化与热裂解沉积[J].燃料化学

- 学报,2002,30(1):78-82.
- FAN Qiming, MI Zhentao, YU Yan, et al. Study on thermal stability of endothermic hydrocarbon fuels for hypersonic propulsion I: Thermal oxidation & pyrolytic deposit [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2002, 30(1):78-82. (in Chinese)
- [2] 杨亮, 丁国良, 黄冬平. 超临界二氧化碳流动与换热研究进展[J]. 制冷学报, 2003(2):51-56.
- YANG Liang, DING Guoliang, HUANG Dongping. Review of flow and transfer of supercritical carbon dioxide [J]. Journal of Refrigeration, 2003(2):51-56. (in Chinese)
- [3] 董其伍, 赵松伟, 刘敏珊. 超临界二氧化碳管内流动及换热特性分析研究[J]. 制冷与空调, 2008, 22(1):1-5.
- DONG Qiwu, ZHAO Songwei, LIU Minshan. The analysis study of supercritical carbon dioxide flow and transfer characteristics in tube[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2008, 22(1):1-5. (in Chinese)
- [4] 淮秀兰, Shigeru K. 微通道内超临界二氧化碳的压降与传热特性[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(5):843-845.
- HUAI Xiulan, Shigeru Koyama. Heat transfer and pressure drop of supercritical carbon dioxide in multi-port channels[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(5):843-845. (in Chinese)
- [5] Thurston R S. Pressure oscillations induced by forced convection heat transfer to two phase and supercritical hydrogen; preliminary experiments[R]. Los Alamos Scientific Laboratory Report LAMS3070 (also N64-21055), 1964.
- [6] Hines W S, Wolf H. Pressure oscillations associated with Heat transfer to hydrocarbon fluids at supercritical pressures and temperatures [J]. ARS Journal, 1962, 3: 361-366.
- [7] Edwards T. USAF supercritical hydrocarbon fuels interests[R]. AIAA 93-0807, 1993.
- [8] Linne D L, Meyer M L, Braun D C. Investigation of instabilities and heat transfer phenomena in supercritical fuels at high heat flux and temperatures[R]. AIAA-2000-3128, 2000.
- [9] Pettersen J, Rieberer R, Leister A. Heat transfer and pressure drop characteristics of supercritical carbon dioxide in microchannel tubes under cooling[C]// Proceedings of 4th IIR-Gustav Lorevitz Conference on Natural Working Fluids. West Lafayette, IN: [s. n.], 2000:99-106.
- [10] Parlattan Y, Tordreas N E, Driscoll M J. Buoyancy and property variation effects in turbulent mixed convection of water in vertical tubes[J]. Heat Transfer, 1996, 118(2): 381-387.
- [11] Pioro I L, Duffey R B, Dumouchel T J. Hydraulic resistance of fluids flowing in channels at supercritical pressures (survey) [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 231(2):187-197.
- [12] Mitra B, Garimella S. Supercritical heat transfer and pressure drop in refrigerant R410A [C] // Proceeding of HT2003 ASME Summer Heat Transfer Conference. Las Vegas, Nevada, USA: Heat Transfer Division, 2003: 21-23.
- [13] Petukhov B S. Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties [J]. Adv. Heat Transf, 1970, 6:504-564.