

文章编号:1000-8055(2013)03-0688-07

螺旋管内超临界航空煤油流动阻力特性

付衍琛, 邓宏武, 吕 品, 徐国强, 冉振华

(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: 研究了系统压力、质量流速及螺旋管结构形式对超临界压力下航空煤油 RP-3 在螺旋管内的流动阻力特性。实验结果表明:螺旋管局部阻力系数变化曲线由螺旋管内流体临界雷诺数、拟临界温度分为明显的 3 个部分:工质温度低于拟临界温度且管内雷诺数小于螺旋管临界雷诺数时,局部损失系数与雷诺数和螺旋直径与管径比 D/d_{in} 相关;流体温度低于拟临界温度且雷诺数大于临界雷诺数时,局部阻力系数只与 D/d_{in} 相关;流体温度大于拟临界温度时,局部阻力系数除与雷诺数和 D/d_{in} 相关外,同时还与密度、黏性的大幅变化相关。另外,基于实验结果,提出了一种用压力、温度和螺旋直径与管径比进行修正的局部阻力系数关联式,拟合结果与实验结果相比,具有较好的一致性。

关 键 词: 超临界; 航空煤油; 流动阻力; 螺旋管; 局部阻力系数

中图分类号: V312

文献标志码: A

Flow resistance characteristics of supercritical aviation kerosene in helix tube

FU Yan-chen, DENG Hong-wu, LÜ Pin, XU Guo-qiang, RAN Zhen-hua

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

Abstract: Based on the experimental results, the effects of pressure, mass flow rate and style of helix tubes on the flow resistance characteristics were analyzed, and the flowing characteristics of aviation kerosene at supercritical pressure flowing through a helix tube were investigated. The results show that: the variation curve of local resistance coefficient was divided into 3 parts by critical Reynolds number and pseudo-critical temperature. Below the pseudo-critical temperature and Reynolds number, the local resistance coefficient was related to Reynolds number and D/d_{in} ; below the pseudo-critical temperature and above the critical Reynolds number, it was just related to D/d_{in} ; above the pseudo-critical temperature, it was not only related to Reynolds number and D/d_{in} , but also to huge variation of density and viscosity. Furthermore, a relational formula was proposed to predict the coefficient of local resistance with pressure, temperature and ratio of screw diameter versus inlet diameter when hydrocarbon fuel flowed through the helix tube at supercritical pressure.

Key words: supercritical; aviation kerosene; flow resistance; helix tube;
local resistance coefficient

收稿日期: 2012-03-12

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130326.1743.201303.688_029.html

基金项目: 国家自然科学基金(50676005)

作者简介: 付衍琛(1990—),男,山东聊城人,博士生,主要从事超临界碳氢燃料流动换热研究。

随着航空发动机性能持续的提高,高温部件热负荷不断加剧,对其冷却技术提出了越来越高的技术要求.通过在航空发动机上安装换热器,使用航空发动机自带燃料预先将用来冷却高温部件的冷却空气进行冷却(cool cooling air, CCA),可以大幅度提高冷却空气的冷却品质,为解决高温部件的冷却问题提供了一条新的思路^[1].在CCA技术背景下,燃油系统压力高于燃油临界压力,换热器中的航空煤油通过与空气换热,将逐渐从亚临界状态过渡到超临界状态,使得流动阻力特性发生显著变化,因此,对超临界燃油在管内的流动阻力特性进行系统研究是十分有必要的^[2].

结合换热器的设计,螺旋管式换热器结构较直管和蛇形管而言具有更好的紧凑型^[3].国内外学者对超临界流体在直管内的流动阻力特性进行了大量的研究,并以水和二氧化碳为工质对螺旋管内流动阻力特性进行了研究^[4-10],然而针对超临界压力下碳氢燃料等多组分介质在螺旋管内的流动阻力特性进行研究相对较少.

本文结合国内外研究成果,在北京航空航天大学超临界流动换热实验台上开展了相关研究,

分析了系统压力,质量流速及螺旋管结构形式等对超临界国产 RP-3 航空煤油在螺旋管内流动阻力特性的影响.

1 实验装置、方案及原理

1.1 实验装置

实验在北京航空航天大学超临界流动换热实验台上进行,实验装置示意图如图1所示.实验中,航空煤油从油箱引出,经油滤去除杂质后,引入柱塞泵.从泵引出的油路分为主油路和旁路:设置旁路通回油箱以便粗调流量;旁路装有安全阀,当油路压力大于9 MPa时能自动泄压,保证泵的安全工作并稳定泵出口压力;主油路则经过流量调节阀、油滤和流量计之后来到预热段,预热段连接稳压交流电源,通过不锈钢管自身的管电阻进行加热,预热温度达到一定值之后进入绝热实验段.从实验段出来的高温煤油经过冷凝器,冷却至常温后流入废油收集箱.实验系统压力通过系统出口的背压阀进行调节控制,质量流速则是通过安装在预热段前的针型精密流量调节阀控制.

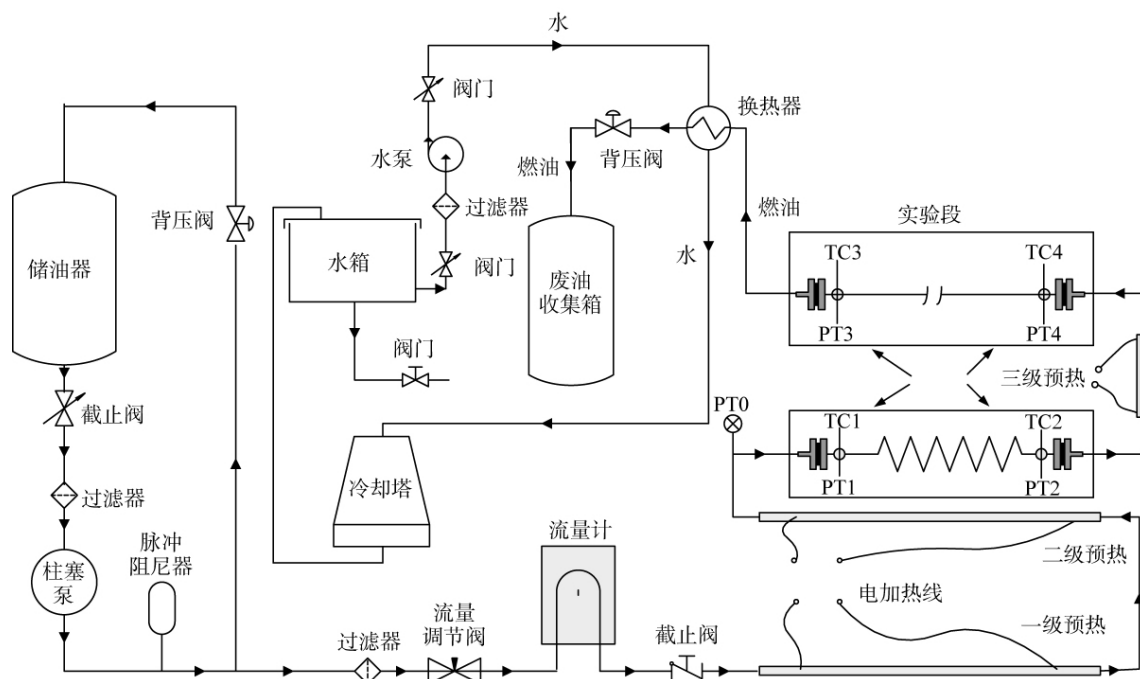


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of supercritical fluid system

实验段为不锈钢螺旋管 1Cr18Ni9Ti(总长为 1700 mm, 内径 $d_{in}=1.8$ mm, 外径 $d_{out}=2.2$ mm), 进出口均留出 100 mm 作为绝热稳定段. 流动阻

力测量长度 $L=1500$ mm, 包括螺旋段及直管段, 螺旋直径分别为 $D=30, 40, 50$ mm, 螺距为 $t=8$ mm, 螺旋圈数分别为 $n=5, 8, 11$. 不同的螺距、螺

旋圈数和螺旋直径变化按照弹簧长度公式计算

$$\alpha = \arctan\left(\frac{t}{D}\right) \quad (1)$$

$$L_1 = \frac{\pi D n}{\cos \alpha} \quad (2)$$

$$L_2 = L - L_1 \quad (3)$$

其中 α 为螺旋升角, 本实验中所有螺旋升角均为 5° ; L_1 为螺旋段长度, L_2 为直管段长度。

通过对不锈钢内壁表面的扫描电子显微镜测量可知, 其内壁表面粗糙度为 $1.308 \mu\text{m}$, 可以认定为水力光滑管。实验段采用 Aspen 绝热材料 (其导热系数为 $0.012 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) 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 (TC1~TC4) 进行测量。实验段压降采用 ROSEMOUNT-3051 型差压变送传感器 (PT1~PT4) 测量; 系统的质量流速用 DMF-1 型科里奥利质量流量计测量, 并经高精度电子天平称重校准。各仪器的测量精度如表 1 所示。实验中保证实验段绝热 (进出口温度温差小于 1 K) 通过改变预热段加热功率而获得不同温度下实验数据。

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
ROSEMOUNT-3051 型差压变送传感器	± 0.065
K 型铠装热电偶	± 0.5

1.2 实验原理及方案

绝热流体在水平螺旋管道内流动时阻力损失为沿程损失与局部损失之和, 沿程损失为沿管长发生的管内摩擦损失, 局部损失由流体流向改变时引起的分离和旋涡等引起。

$$\Delta p_t = \Delta p_i + \Delta p_r \quad (4)$$

其中 $\Delta p_i, \Delta p_t, \Delta p_r$ 分别为直管进出口、螺旋管进出口、螺旋管局部回弯压差。

1.2.1 沿程压降损失

螺旋管沿程损失影响因素较多, 为简化分析, 假定其沿程损失与直管相同, 该方法在工程上应用较为普遍。

$$\Delta p_i = \lambda \cdot \frac{l}{d_{in}} \cdot \frac{\rho u^2}{2} = \frac{2\dot{m} \cdot u}{\pi d_{in}^2} \cdot \frac{l}{d_{in}} \cdot \lambda = \frac{8 \cdot \dot{m}^2}{\pi^2 \cdot d_{in}^4 \cdot \rho} \cdot \frac{l}{d_{in}} \cdot \lambda \quad (5)$$

其中 l 为螺旋管长度, λ 为直管阻力系数, $\dot{m}$ 为质量流量, ρ 为流体密度, u 为流体速度。

1.2.2 局部压降损失

螺旋管压降可以表示为沿程压降与局部回弯压降之和

$$\Delta p_t = \Delta p_i + \Delta p_r = \Delta p_i + \zeta \cdot \frac{\rho u^2}{2} = \Delta p_i + \zeta \cdot \frac{2\dot{m} \cdot u}{\pi d_{in}^2} \quad (6)$$

由上式得到局部阻力系数的计算公式:

$$\zeta = \frac{2\Delta p_r}{\rho u^2} = \frac{(\Delta p_t - \Delta p_i) \pi^2 \cdot d_{in}^4 \cdot \rho}{8 \cdot \dot{m}^2} = \zeta(\Delta p_t, \Delta p_i, \dot{m}, d_{in}, \rho) \quad (7)$$

其中 ζ 为全螺旋管局部阻力系数。本文近似假设单个螺旋圈流动损失之间互不影响, ζ 与螺旋圈数 n 成正比例关系。

为消除连接接头处的局部阻力压降对整体压降测量的影响, 各实验工况下 RP-3 在螺旋管内的局部损失压降通过弯管压降和相同长度的直管压降求的。

$$\Delta p_r = \Delta p_{t,2} - \Delta p_{t,1} \quad (8)$$

实验示意如图 2、图 3 所示。

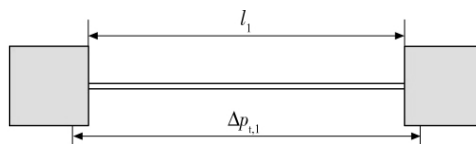


图 2 直管段示意图

Fig. 2 Schematic of straight tube

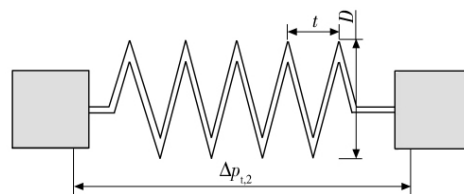


图 3 螺旋管段示意图

Fig. 3 Schematic of helix tube

2 实验结果及分析

通过之前学者的实验研究已经测得航空煤油 RP-3 的临界压力与临界温度分别为 2.33 MPa , 645.04 K 。不同超临界压力下航空煤油 RP-3 的临界温度如表 2 所示。

表2 不同超临界压力下拟临界温度

Table 2 Pseudo-critical temperature at different super-critical pressures

压力/MPa	拟临界温度/K
3	672
4	697
5	723

超临界压力下的航空煤油物理性质变化较大,讨论其在螺旋管内的流动阻力特性时需考虑物性变动的影响.本文结合煤油物性讨论了系统压力、质量流量及其螺旋管特性等对螺旋管局部阻力系数的影响.

2.1 系统压力对实验段局部阻力系数的影响

图4分别给出了系统压力为4,5,6 MPa时,超临界压力下RP-3在同一个螺旋管中流动时局部阻力系数随温度和 Re 的变化情况.其中螺旋管参数:螺旋直径为40 mm,螺旋圈数 $n=8$;实验段进口温度变化范围为350~800 K;实验中质量流速为 $G=1179 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 保持不变.

图4(a)表征了压力4 MPa、质量流速 $G=1179 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时航空煤油密度、黏度及局部阻力系数随温度变化的趋势.根据之前的实验研究,5,6 MPa压力下航空煤油密度、黏度的变化趋势与4 MPa压力下具有相似性^[11].在质量流量不变的情况下,工质温度的升高会带来两方面的影响:一是流体密度的减小;二是流体黏性的减小.这两者对压降的贡献正好相反:密度的减小使得流体流动速度的增加,导致壁面处速度梯度增大,在黏性不变的情况下将导致压降的增加;黏性的减小在速度梯度不变的情况下将导致壁面切应力减小,使得管路压降减小.根据密度和黏性测量结果,350~520 K范围内,各压力下黏性减小了约75%,而密度只减小了约23%.因此该温度范围内密度的减小并未引起速度梯度发生明显变化,黏性减小所引起的流阻减小量要大于由于流速增大所引起的流阻增加量,局部阻力系数呈下降趋势.流体温度超过约520 K以后,黏性的变化速率逐渐减小,而密度的变化速率逐渐变大,导致管内摩擦压降随着流体温度的升高而升高.当温度进一步增加到临界温度(645.04 K)附近时,螺旋管局部阻力系数达到最大值.从图4(b)中可以看到,工质温度超过拟临界温度时黏性减小速度大于密度减小速度,局部阻力系数随着温度的升高

而逐渐减小,实验范围内系统压力对局部损失系数的影响较小.

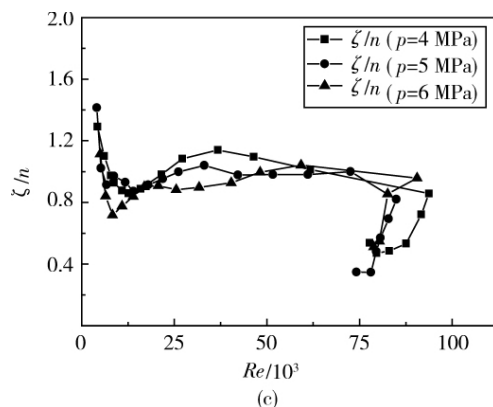
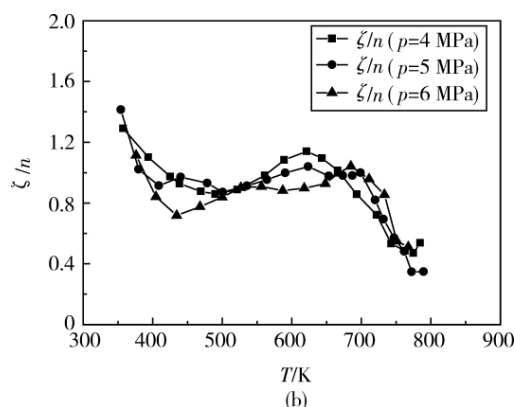
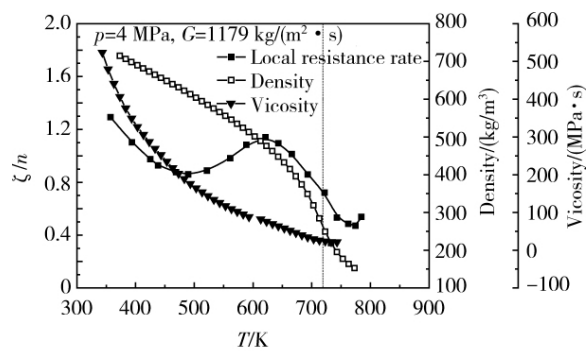


图4 系统压力对局部阻力系数的影响

Fig. 4 Effects of pressure on local resistance coefficient

流体在螺旋管中流动时,受到强烈的离心力作用,当 Re 超过临界雷诺数 Re_c 时产生垂直于主流方向的二次流,其摩擦阻力高于直管^[10].二次流对螺旋管的流动稳定有一定好处,文献中关于临界雷诺数 Re_c 主要有Ito(1959年),Schmidt(1967年)和Srinivasan(1968年)三式^[12-13].对照实验的具体方案,3个公式对临界雷诺数的估计值分别为7414.1,7199.7,7445.7,相差约为0.4%,

本文采用 Ito 公式作为分段标准.

从图 4(c)中可以看出,当 $Re < 7414$, 即 $Re < Re_c$ 时,局部损失系数随 Re 的增大而减小,螺旋管内流体为有二次流的层流,受螺旋管内壁摩擦力的影响较大,随着 Re 的增大,壁面附面层厚度变小,因此局部损失系数逐渐减小.当 $7414 < Re < 15000$ 时,局部损失系数随 Re 变化不大,流体处于湍流流动状态,阻力系数变化关系较为复杂,但从最终结果来看,局部损失系数不再是流动速度的函数,而只与形状参数相关;随着工质温度的增加,在工质温度超过拟临界温度后,管内 Re 逐渐减小,局部损失系数显著变小,说明拟临界温度附近工质物性的大幅变化对局部损失系数产生较大的影响.

2.2 螺旋直径对实验段局部阻力系数的影响

图 5 以 5 MPa 为例,分别给出了螺旋直径为 30, 40, 50 mm, 即 D/d_{in} 为 16.7, 22.2, 27.6, RP-3 在管内流动时局部阻力系数随温度、 Re 的变化情况.

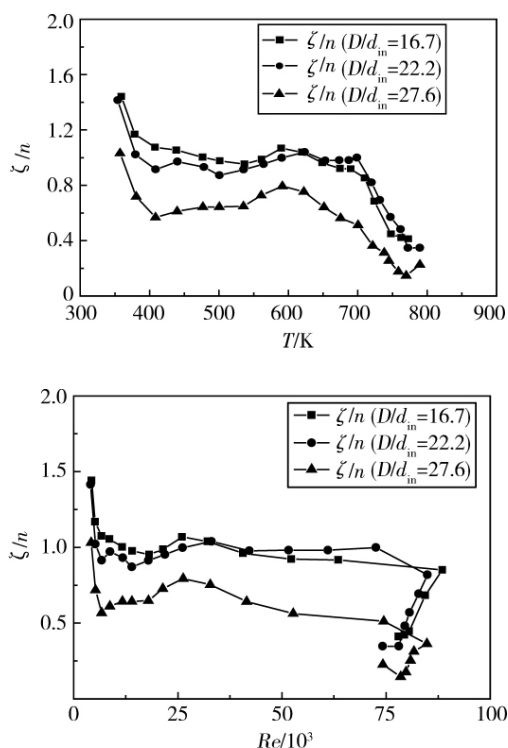


图 5 螺旋直径对局部阻力系数的影响

Fig. 5 Effects of screw diameter on local resistance coefficient

从图 5 可以看出,相同温度及相同 Re 条件下局部损失系数随着螺旋直径的减小而增大,但当 $D/d_{in} < 22.2$ 后,局部损失系数随 D/d_{in} 的减小变

化幅度较小.

弯头阻力损失主要来自于流体流过弯头时造成的流体分离和二次流所产生的损失.螺旋直径越小,流体转弯时作用于流体上的离心力越大,逆压梯度越大,因此由于转弯引起的分离旋涡区越大,两次流越强,两者引起的损失越大,因此局部损失系数也越大;反之越小.当 $D/d_{in} < 22.2$ 后,离心力增大的速度减慢,从而对于局部阻力系数的影响减小,螺旋直径不再是影响局部阻力系数的主要因素.

2.3 质量流速对实验段局部阻力系数的影响

图 6 以压力为 5 MPa,螺旋直径为 40 mm、螺旋圈数 $n = 8$ 为例,分别给出了质量流速为 786, 1179, 1572 $kg/(m^2 \cdot s)$, RP-3 在管内流动时局部阻力系数随温度、 Re 的变化情况.

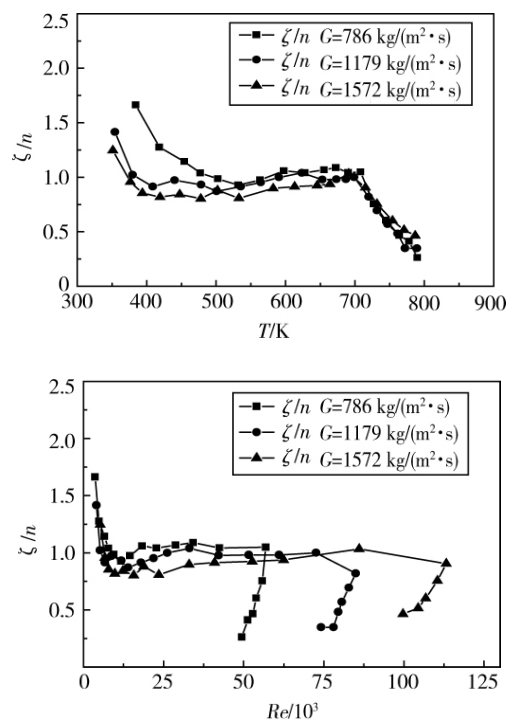


图 6 质量流速对局部阻力系数的影响

Fig. 6 Effects of mass velocity on local resistance coefficient

图 6 可以看出,局部损失系数随质量流速的增大而略有减小,但总体而言,实验范围内质量流速对局部损失系数影响并不十分明显.由超临界压力下 RP-3 在不同温度时的黏性数据可知^[14],通过提高实验段流体温度诱发,在质量流量不变的情况下,管内 Re 的大小取决于黏性的大小.拟临界温度之前,黏性随着温度的升高而减小;当燃油温度超过其拟临界温度后,黏性随温度的变化

基本保持不变,由雷诺数计算式 $Re = 4G/\mu\pi d_{in}$ 可知,超临界压力下流体黏性在拟临界温度达到最小值,因此 Re 在拟临界点有最大值。当温度继续升高时,管内 Re 会减小,因此各图中每个质量流速工况对应了一个 Re 的最大值。不同质量流速下 Re 达到最大值后,管内流体流动为强烈湍流状态,螺旋管造成的局部损失对总体压降已经很小,局部损失系数呈急剧下降趋势。低于最大 Re 时,局部阻力系数主要受到螺旋管形状参数的影响,形状相同的螺旋管在相同工况下局部阻力系数具有相同的变化趋势。

2.4 局部阻力系数关联式拟合

从上述实验分析可知,超临界 RP-3 航空煤油在螺旋管内流动过程中,其局部损失系数除受螺旋直径的影响比较明显外,与系统压力、质量流速、螺距的关系不大;同时,阻力系数变化曲线由临界 Re ,拟临界温度分为明显的三部分。因此,本文采用如下形式对实验结果进行了拟合:

$$\zeta = c \begin{cases} n \cdot a_1 Re^{b_1} \left(\frac{D}{d_{in}}\right)^{c_1}, & Re < Re_c \text{ 且 } T < T_{pc} \\ n \cdot a_2 \left(\frac{D}{d_{in}}\right)^{c_2}, & Re \geq Re_c \text{ 且 } T < T_{pc} \\ n \cdot a_3 Re^{b_3} \left(\frac{D}{d_{in}}\right)^{c_3} \left(\frac{\rho}{\rho_{pc}}\right)^{d_3} \left(\frac{\mu}{\mu_{pc}}\right)^{e_3}, & T \geq T_{pc} \end{cases} \quad (9)$$

拟合结果为

$$\zeta = c \begin{cases} n \cdot 2.211 \cdot 8.23 Re - 0.6513 \left(\frac{D}{d_{in}}\right)^{-0.6578}, & Re < Re_c \text{ 且 } T < T_{pc} \\ n \cdot 8.350 \left(\frac{D}{d_{in}}\right)^{-0.7522}, & Re \geq Re_c \text{ 且 } T < T_{pc} \\ n \cdot 0.6931 Re^{0.3040} \times \left(\frac{D}{d_{in}}\right)^{-0.3725} \left(\frac{\rho}{\rho_{pc}}\right)^{0.5720} \left(\frac{\mu}{\mu_{pc}}\right)^{0.4594}, & T \geq T_{pc} \end{cases} \quad (10)$$

适用范围

$$16.7 \leq D/d_{in} \leq 22.2, \quad 5 \leq n \leq 11$$

式中 ρ_{pc}, μ_{pc} 分别为各压力下拟临界点密度与黏性数据。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 $\pm 25\%$ 之间。

但是该拟合式具有一定的局限性,即只针对流体在超临界压力下流过螺旋管的情况。

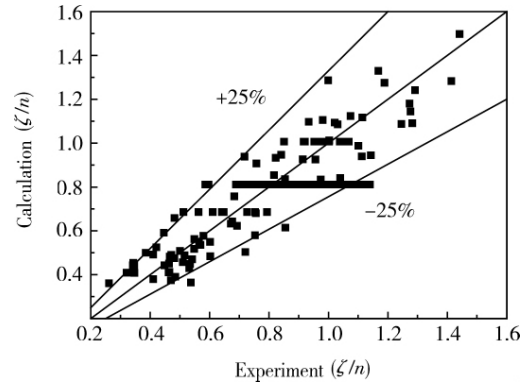


图7 实验结果与拟合修正式计算结果对比

Fig. 7 Comparison between the measured and calculated values

2.5 误差分析

由公式(11)可得

$$\frac{\Delta \zeta}{\zeta} = \sqrt{\xi_r (\Delta p_r)^2 + \xi_r \rho^2 + 16 \xi_r d_{in}^2 + 4 \xi_r \dot{m}^2} = \sqrt{\xi_r (\Delta p_{t,2} - \Delta p_{t,1})^2 + \xi_r \rho^2 + 16 \xi_r d_{in}^2 + 4 \xi_r \dot{m}^2} \quad (11)$$

其中实验段压差是由高精度压差变送器测量,对应测量误差为 ± 0.325 kPa。由公式

$$\xi_r (\Delta p_r) = \xi_r (\Delta p_{t,2} - \Delta p_{t,1}) = \frac{\xi(\Delta p_{t,1}) + \xi(\Delta p_{t,2})}{\Delta p_{t,2} - \Delta p_{t,1}} \quad (12)$$

可知 $\Delta p_i, \Delta p_r$ 的相对误差分别为 $\pm 5.20\% \sim \pm 0.31\%, \pm 11.81\% \sim \pm 2.28\%$ 。

根据文献[15]分析,流体密度的测量相对误差为 1.27%。实验段管径通过扫描电镜测量,测量相对误差为 0.2%;质量流速测量相对误差为 0.15%。由此可得螺旋管局部阻力系数的标准测量不确定度为 $\pm 11.90\%$,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,研究了超临界压力下航空煤油在螺旋管内的阻力特性,得到了系统压力、温度、质量流速、螺旋管结构形式等对其阻力特性的影响规律,得到了以下 3 个研究结论:

1) 螺旋管局部阻力系数受到螺旋直径的影响比较明显,系统压力、质量流速对局部损失系数的影响较小。

2) 螺旋管局部阻力系数变化曲线由螺旋管

临界 Re , 拟临界温度分为明显的 3 个部分: 工质温度低于拟临界温度且管内 Re 小于螺旋管临界雷诺数时, 管内为存在二次环流的层流, 局部损失系数与 Re 和 D/d_{in} 相关; 流体温度低于拟临界温度且 Re 大于 Re_c 时, 局部阻力系数只与 D/d_{in} 相关; 流体温度大于拟临界温度时, 局部阻力系数除与 Re 和 D/d_{in} 相关外, 同时还与密度、黏性的大幅变化相关。

3) 本文基于实验数据, 对螺旋管局部阻力系数计算公式进行了压力、温度和螺旋直径与管径比的修正, 在实验范围内拟合得到了超临界航空煤油 RP-3 在螺旋管内的局部损失系数计算公式, 拟合结果与实验结果相比, 具有较好的一致性。

参考文献:

- [1] Chepkin V. New generation of Russian aircraft engines conversion and future goals[R]. ISABE 99-7042, 1999.
- [2] 黄树军. 航空发动机换热器的应用研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006.
HUANG Shujun. Application investigation of heat exchanger on aero-engine[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [3] 李广军, 郭烈锦, 陈学俊. 卧式螺旋管气液两相流摩擦阻力特性研究[J]. 动力工程, 1997, 17(4): 28-32.
LI Guangjun, GUO Liejin, CHEN Xuejun. Study of the frictional resistance characteristics of gas-liquid two fluid in horizontal spiral tubes[J]. Power Engineering, 1997, 17(4): 28-32. (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 K. 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] 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)
- [6] Thurston R S. Pressure oscillations induced by forced convection heat transfer to two phase and supercritical hydro-
gen; preliminary experiments[R]. Los Alamos Scientific Laboratory Report N64-21055, 1964.
- [7] Hitch B, Karpuk M. Experimental investigation of heat transfer and flow instabilities in supercritical fuels[R]. AIAA 97-3043, 1997.
- [8] 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: International Institute of Refrigeration, 2000: 99-106.
- [9] Diane L L, Michael L M, Donald C B. Investigation of instabilities and heat transfer phenomena in supercritical fuels at high heat flux and temperatures[R]. AIAA-2000-3128, 2000.
- [10] 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.
- [11] 张春本. 超临界压力下碳氢燃料的流动与换热特性研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2011.
ZHANG Chunben. Investigation of flow and heat transfer characteristics of hydrocarbon fuel at supercritical pressures[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [12] 张西民, 郭烈锦, 冯自平. 不同倾角放置螺旋管汽液两相摩擦阻力特性[J]. 化工学报, 1999, 50(3): 373-379.
ZHANG Ximin, GUO Liejin, FENG Ziping. Frictional pressure drop characteristics of steam-water two-phase flow in helically coiled tubes oriented with various axial angles[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1999, 50(3): 373-379. (in Chinese)
- [13] 屠传经, 陈学俊. 螺旋管式蒸汽发生器的流动与换热特性[J]. 核动力工程, 1982, 3(5): 52-59.
TU Chuanjing, CHEN Xuejun. Flow and heat transfer characteristic s of the helical tube steam generators[J]. Nuclear Power Engineering, 1982, 3(5): 52-59. (in Chinese)
- [14] DENG Hongwu, ZHU Kun, XU Guoqiang, et al. Isobaric specific heat capacity measurement for kerosene RP-3 in the near-critical and supercritical region [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2012, 57(2): 263-268.
- [15] 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.