

文章编号: 1000-8055(2010)02-0331-05

超临界压力下航空煤油 RP-3 焓值的测量 及换热研究

张春本, 邓宏武, 徐国强, 黄文, 朱 锟
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 基于能量守恒原理提出了一种超临界压力下中国 3 号喷气燃料 RP-3 焓值的测量方法, 同时对不同超临界压力下 RP-3 在 323~843 K 内的焓值进行了测量. 结果表明当燃油温度低于其临界温度时, 不同超临界压力下燃油的焓值几乎是一样的, 当温度高于临界温度后, 不同压力下 RP-3 焓值之间的差异随着压力的升高而缩小. 另外, 根据焓值曲线计算出的燃油温度及吸热量与先前已做的其他流动与换热实验中的测量数据进行了对比, 结果表明该焓值是准确可靠的, 满足未来航空发动机内空油换热器的设计要求. 最后, 研究了热流密度对超临界煤油换热的影响, 结果显示当燃油对比温度小于 1.179 (760 K) 时, Nu 数随着热流密度的增加而增加.

关 键 词: 超临界压力; 临界温度; RP-3; 焓值; 热流密度

中图分类号: V312

文献标识码: A

Enthalpy measurement and heat transfer investigation of RP-3 kerosene at supercritical pressure

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

(School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A method of measuring the enthalpy of China's No. 3 jet fuel RP-3 at supercritical pressure was proposed based on the principle of energy conservation. At the same time, the enthalpy of RP-3 at different supercritical pressures between 323 K and 834 K was measured. The results indicate that, the enthalpy of RP-3 at different pressures is almost the same when the fuel temperature is lower than its critical temperature. When the fuel temperature is higher than its critical temperature, the difference of enthalpy at different supercritical pressures declines with the growing pressure. In addition, the temperature of RP-3 calculated by the curve of enthalpy had been compared with the measurement value, showing that the measurement of enthalpy is accurate and reliable. At last, the influence of heat flux on heat transfer of RP-3 was studied. The test results indicate that the Nusselt number increases with heat flux if the bulk fuel temperature T_b/T_c is lower than 1.179 (760 K).

Key words: supercritical pressure; critical temperature; RP-3; enthalpy; heat flux

随着航空技术的进一步发展, 发动机的热负荷将会越来越重, 发动机热端部件的冷却问题在

收稿日期: 2009 10 27; 修订日期: 2009 12 22

基金项目: 国家自然科学基金(50676005)

作者简介: 张春本(1985-), 云南保山人, 博士生, 主要从事传热传质及超临界碳氢燃料的流动与换热研究.

很大程度上成为了航空发动机的发展瓶颈. 据相关报道, 未来航空发动机的增压比将提高到 40 左右, 从压气机引出的冷却空气温度将达到 900 K, 其冷却品质大幅度降低, 使得涡轮等高温部件冷却更加困难, 给航空发动机的热端部件的可靠运行带来了极大的挑战. 从传热学的角度看, 在冷气用量和内部冷却结构都无法大幅度变化的前提下, 最有效的方法就是考虑如何降低冷却空气本身的温度, 提高冷气本身品质.

用航空煤油对冷却空气进行冷却, 以提高其冷却品质是一种具有广阔应用前景的方案. 航空煤油作为天地往返运载器的一种新型高能燃料, 燃烧前可在飞行器高温部件表面进行物理和化学吸热, 降低发动机等高温部件的表面温度, 同时化学反应产生的高能小分子产物又通过在燃烧室里燃烧, 释放出吸收的热量, 这样既对飞行器表面进行了冷却, 又提高了能量的利用率^[1-2]. 航空煤油作为冷源具有非常巨大的优势, 其焓值可分为两部分: 一部分, 是物理吸热量, 即显焓; 另一部分, 是吸热化学反应引起的化学吸热量^[3]. 以美国 JP8 军用航空煤油为例, 1 kg 该航空煤油从常温 298 K 加热到 800 K, 吸热量达到 1600 kJ, 吸热能力十分显著^[4-6].

本文对来自中国航油集团北京分公司的中国 3 号喷气燃料 RP-3 在超临界压力下的焓值进行了测量, 通过与我们之前所做的大量实验数据对

比说明该测量结果是准确可靠的, 可很好的满足科学研究及工程应用的要求.

1 实验设备、参数及数据处理方法

1.1 实验设备

实验系统简化图如图 1 所示, 实验段竖直安装并采用一种纳米新型绝热材料 Aspen 进行有效绝热, 实验中直接利用实验段的管电阻通电加热, 加热功率由实时记录的实验段两端的电压及电流计算得出, 热损失经标定后得出其相对值低于 3%. 燃油贮存在油箱里经高压柱塞计量泵后其压力可达到 16 MPa. 燃油的流量是通过科力奥利质量流量计测量的(型号 DM F-1). 实验段出口处的静压以及实验段进出口的压差分别由安装在实验段出口处的绝对压力传感器及实验段两端的压力变送器测量得出, 其型号分别为 Rosemount 3051CA4 和 Rosemount 3051CD4, 燃油温度通过安装在进出口的铠装热电偶测量, 所有测量数据均被采集到电脑终端进行处理.

1.2 实验参数

实验段内径为 1.8 mm, 外径为 2.2 mm, 长度为 2000 mm 的 T304 不锈钢管, 进口段长度为 50 倍管内径, 出口段长度为 30 倍管内径, 在实验段两端焊有 15 mm × 15 mm × 5 mm 的铜电极.

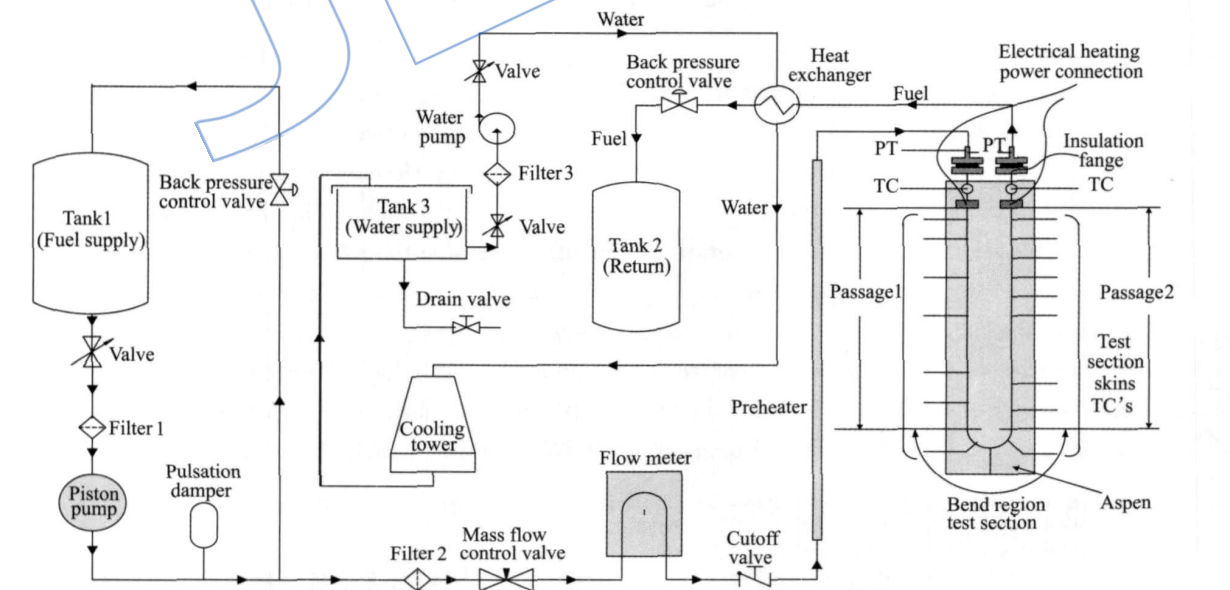


图 1 实验系统简化图

Fig. 1 Schematic of the supercritical fluid system

实有验段外表面上焊 30 支直径为 0.1 mm 的镍铬-镍硅热电偶用于测量外壁温并进而计算热损失。在实验段两端分别装有混合腔用于测量煤油的进出口温度。

在本文的实验中, 出口压力分别为 3, 4, 5, 6 MPa 和 7 MPa, 均高于 RP-3 的临界压力 2.39 MPa (临界温度为 645.35 K)^[7], 流量保持在 3 g/s (1170 kg/(s·m²)), 进口温度固定在 313 K, 出口温度则在不断的升高, 当温度达到约 843 K 时停止实验。

1.3 仪器精度

在出口压力不变的情况下, 质量流量计经质量测量法标定后其精度为 ±0.25%, 绝对压力传感器及差压变送器经标定后其精度为 ±0.2%, 所有的热电偶经过水槽、油槽及恒温炉标定后其精度为 0.5℃, 带变送输出的电压表及电流表的精度等级均为 0.2 级。

1.4 实验原理及数据处理方法

1.4.1 RP-3 焓值测量原理及数据处理

所谓焓值就是指吸热型碳氢燃料在一定的条件下, 升温到某一指定温度时的物理吸热量(包括显热和潜热)和化学吸热量(燃料中大分子化合物裂解成小分子化合物所吸收热量的总和)^[6]。蒋武, 李组光等人^[8-9]曾采用高温热导型流动热量计测定了自制的吸热型碳氢燃料在 973 K 及 1073 K 时的热沉(即焓值), 其主要目的是满足超高速飞行器的热管理需求, 因此测量的温度比较高。在本文里, 作者对 323~843 K 内喷气燃料 RP-3 的焓值进行了测量, 其主要目的则是满足未来航空发动机内空油换热器的设计需求, 因此测量温度相对较低一些。

本文中焓值指的是喷气燃料 RP-3 在一定条件下单位质量的吸热能力。在实验过程中, 物理吸热与化学反应吸热是同时进行的, 因此根据能量守恒原理可知煤油的焓值等于单位质量煤油的实际吸热量, 其表达式如下:

$$h_{out} = h_{in} + (UI - Q_{loss})/m \tag{1}$$

式中 h_{out} 为某一出口温度条件下煤油的焓值, h_{in} 为进口煤油的焓值, 在低温条件下等于进口煤油的焓, U 和 I 分别为实验段的电压及电流, m 为质量流量, Q_{loss} 为整个实验段的热损失, 其定义如下:

$$Q_{loss} = \sum_{i=1}^{31} q_i \pi d_{out} L_i \tag{2}$$

q_i 与 L_i 分别为局部平均热损失热流密度与局部长度, 其中 q_i 由下式计算得出:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= q(T_{w,out}^1) - \frac{[q(T_{w,out}^{29}) - q(T_{w,out}^1)]x_1}{2(x_2 - x_1)} \\ q_i &= [q(T_{w,out}^i) + q(T_{w,out}^{i-1})]/2 \\ q_{31} &= q(T_{w,out}^{30}) + \frac{[q(T_{w,out}^{30}) - q(T_{w,out}^{29})](L - x_{30})}{2(x_{30} - x_{29})} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} i &= 1 \\ 1 < i < 31 \\ i &= 31 \end{aligned} \tag{3}$$

式中 $q(T_{w,out}^i)$ 为局部热损失热流密度, 可由标定后热损失曲线直接求出, x_i 为热电偶距入口处铜电极的距离。

说明: 在本文的实验中, RP-3 航空煤油在 313 K 时的焓值为零。

以上推导过程基于能量守恒定律, 因此可适用于不同工质及不同压力下流体的焓值测量。

1.4.2 管内局部表面传热系数计算

管内局部表面传热系数 h_x 通过下式定义:

$$h_x = \frac{q_x}{T_{w,x} - T_{b,x}} \tag{4}$$

其中 q_x 为有效壁面热流, 定义如下:

$$q_x = \frac{l^2 \rho(T) / [\pi(d_o^2 - d_i^2)] l}{\pi d} - q_{loss,x} \tag{5}$$

式中 $\rho(T)$ 为不锈钢的电阻率, 与温度有关。

管内局部 Nusselt 数可由下式求得:

$$Nu_x = \frac{h_x d}{\lambda_c} \tag{6}$$

其中 λ_c 为 RP-3 的当地导热系数。

2 试验结果及分析

2.1 焓值的测量与分析

图 2 为不同压力下 RP-3 的焓值与油温的关系, 从图中可以看出, 当燃油温度低于临界温度时, 超临界压力下煤油的焓值几乎是相同的, 这主要是因为当燃油温度低于其临界温度时, 化学反应吸热量所占的比例非常小, 同时, 不同超临界压力下 RP-3 的比热容也基本相当, 这与采用十组分替代煤油^[10]所计算出的煤油物性的变化趋势是相同的(如图 3 所示)。燃油温度高于临界温度后, 焓值随着压力的升高而降低。另外, 当压力 3 MPa(对比压力约为 1.26), 焓值曲线斜率在临界点后有较大变化, 当压力进一步提高到 6 MPa(对

比压力约为 2.5) 以上时, 不同压力下 RP-3 的焓值之间的差异越来越小, 这说明随着压力的提高, RP-3 的拟临界温度也在提高, 同时, 煤油比热容之间的差异也随着压力的升高而减小, 这同样与采用十组分替代煤油比热容计算值的理论变化趋势也是相符的。

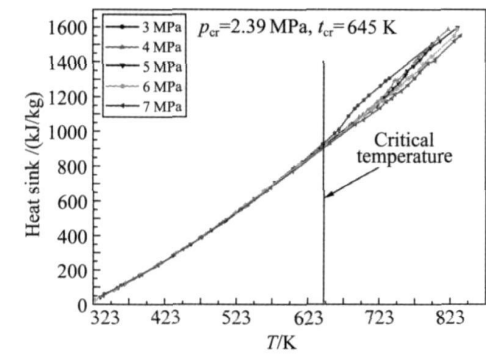


图 2 RP-3 焓值与温度的关系

Fig. 2 Relationship between enthalpy and temperature

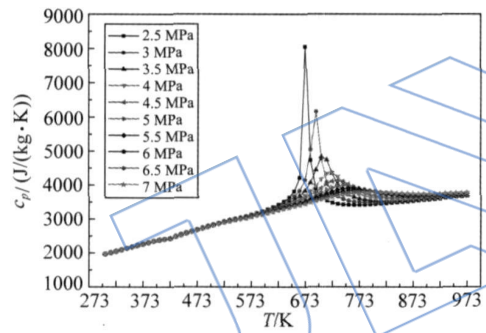


图 3 不同压力下替代煤油比热容计算值与温度的关系

Fig. 3 Relationship between specific heat and temperature

焓值曲线主要用途便是用来计算一定吸热量下燃油的温度以及一定温差下燃油的吸热量, 为说明测量结果的准确性, 图 4 和图 5 分别给出了 5 MPa 压力下根据焓值曲线计算出的油温以及根据进出口温差计算出的燃油吸热量与我们前期流动与换热实验中实际测量的数据进行了对比, 温度单位为 K, 图 4 中 382 个数据点中有 374 个点在 $\pm 1\%$ 的误差带内, 占到总数的 97.9%, 有 307 个点在 $\pm 0.5\%$ 误差带以内, 占总数的 80.4%, 大多数的误差的主要原因可能是由热电偶的测量精度引起的。图 5 中 374 个数据点中有 303 个点在 $\pm 2\%$ 的误差带以内, 其主要误差则可能是由热电偶的测量精度及热损失计算误差所引起的。

从数据点的分布情况可以看出, 根据焓值曲

线来反算燃油的温度及吸热量是可行的, 它完全满足科学研究及工程应用的要求。

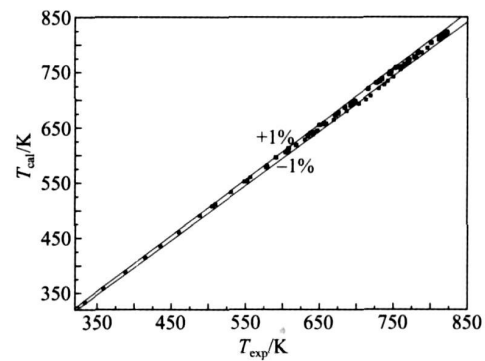


图 4 5 MPa 压力下燃油温度的计算值与测量值的比较

Fig. 4 Comparison of calculated temperature value against the measurement value of RP-3

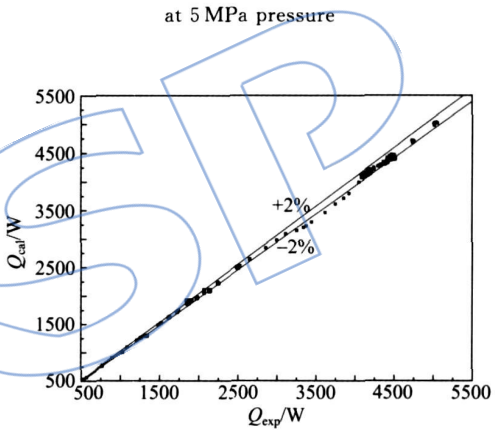


图 5 5 MPa 压力下燃油吸热量的计算值与测量值的比较

Fig. 5 Comparison of calculated power value against the measurement value of RP-3 at 5 MPa pressure

2.2 热流密度对换热的影响

图 6 分别给出了 2mU 型管的局部 Nusselt

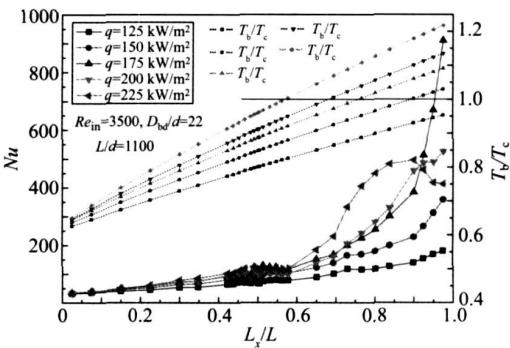


图 6 热流密度对传热的影响

Fig. 6 Influence of heat flux on heat transfer

数 Nu_x 和无量纲油温 T_b/T_c 在不同热流密度条件下随着无量纲长度的变化,进口温度为 403 K。从图 1 中可以看出, Passage 1 为竖直向下流动, Passage 2 为竖直向上流动。从图 6 中可以看出,在 Passage 1 中, Nu 数沿管长是增加的,这主要是因为沿管长方向燃油温度升高的缘故。煤油的密度、黏性、导热系数会随着温度的升高而减小,在拟临界点前,比热容则随着温度的增加而增加,密度的减小会引起当地雷诺数的增加,黏性的降低则会使附面边界层厚度变薄,而比热容的增大则会增强燃油的吸热能力,导热系数的减小则会削弱热量的传递,但它们的综合作用则导致了换热的增强。在 U 型管的弯曲区域,当进口雷诺数为 3 500 时,热流密度对该处的换热没有明显的影响;另外,从图 6 中还可以看出临界区域发生在 Passage 2,其确切位置依赖于进口雷诺数、热流密度及其他相关参数。当燃油温度接近于它的临界点时传热得到强化,其原因可能是“相变”、浮升力的作用以及重要的物性参数比如说密度、比热容、导热系数及黏性等发生了重大变化;最后,由于碳氢燃料达到一定温度后会发​​生结焦及裂解等现象,当燃油温度超过 753.15 K (480 °C) 时将会发生严重的表面碳沉积并导致传热恶化^[11-12]。因此,在热流密度 $q=225\text{ kW/m}^2$ 的情况下,当燃油对比温度超过 1.179 时由于碳沉积速率的显著加快导致 Nu 数开始降低。

3 结 论

1) 当 RP-3 的温度低于它的临界温度时,不同超临界压力下 RP-3 的焓值几乎是一样的。当燃油温度高于它的临界温度时,不同超临界压力下煤油焓值的差异随着压力的升高而减小。

2) 当对比压力低于 1.26 时, RP-3 的焓值曲线在临界温度后会​​发生较大变化。

3) 当对比压力大于 2.5 时,不同压力下 RP-3 在 323~843 K 的焓值之间的差异非常小。

4) 利用 RP-3 的焓值曲线来计算一定吸热量下 RP-3 的温度以及一定温差下燃油的吸热量是准确可靠的。

5) 超临界压力下 RP-3 的焓值测量方法同样适用于亚临界压力下的测量,而且适用于所有流体焓值的测量。

6) 热流密度对换热的影响主要是通过燃油温度及壁面温度的变化进行传递的,当燃油温度

接近它的临界温度时,换热得到明显强化,当燃油对比温度大于 1.179 时,发生了传热恶化现象。

参考文献:

- [1] Jackson K, Corporan E, Buckley P, et al. Test results of an endothermic fuel reactor [R]. AIAA 95-6028.
- [2] Lander H R. Endothermic fuels for high Mach vehicles[J]. American Chemical Society, Division of Petroleum, 1987, 32 (2): 504-509.
- [3] Tran L B, Chen L D. Heat transfer calculation of an endothermic fuel at super critical conditions [R]. AIAA 98-3762.
- [4] Huang He, Spadaccini L J, Sobel D R. Fuel-cooled thermal management for advanced aeroengines[J]. Journal of Engineering Gas Turbines and Power, 2004, 126: 284-293.
- [5] Hitch B, Karpuk M. Experimental investigation of heat transfer and flow instability in supercritical fuels[R]. AIAA-1997-3043.
- [6] Hitch B, Karpuk M. Enhancement of heat transfer and elimination of flow oscillations in supercritical fuels [R]. AIAA-98-3759.
- [7] 孙青梅,米镇涛,张香文. 吸热型碳氢燃料 RP-3 仿 JP-7 临界性质的测定[J]. 燃料化学学报, 2006, 34(2): 466-470.
SUN Qingmei, MI Zhentao, ZHANG Xiangwen. Determination of critical properties of endothermic hydrocarbon fuels RP-3 and simulated JP-7[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, 32(2): 466-470. (in Chinese)
- [8] 蒋武,郭永胜,雷群芳,等. 吸热型碳氢燃料热沉的测定研究[J]. 燃料化学学报, 2002, 30(1): 28-32.
JIANG Wu, GUO Yongsheng, LEI Qunfang, et al. Study on heat sink of endothermic fuels [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2002, 34(1): 28-32. (in Chinese)
- [9] 李组光,高涵,历刚,等. 吸热型碳氢燃料热沉的测定[J]. 推进技术, 1998, 19(2): 96-99.
LI Zuguang, GAO Han, LI Gang, et al. Measurement of heat sink for endothermic fuels[J]. Journal of Propulsion Technology, 1998, 19(2): 96-99. (in Chinese)
- [10] Zhang F Q, Fan X J, Yu G, et al. Heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions[R]. AIAA-2008-4615, 2008.
- [11] Ervin J S, Williams T F. Flowing studies of JP-8+ 100 jet fuel at supercritical conditions[R]. AIAA-1998-3760.
- [12] 王英杰,徐国强,邓宏武,等. 进口油温对 RP-3 影响航空航空煤油结焦特性实验[J]. 航空动力学报, 2009, 24(9): 1972-1976.
WANG Yingjie, XU Guoqiang, DENG Hongwu, et al. Experimental study of influence of inlet temperature on aviation kerosene coking characteristics [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(9): 1972-1976. (in Chinese)