

超临界压力下航空煤油流动与传热特性试验^{*}

江晨曦, 仲峰泉, 范学军, 俞 刚

(中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘 要: 本文针对超燃冲压发动机再生冷却系统运行条件, 实验研究了大庆 RP-3煤油在超临界压力下的流动和传热特性, 目的在于研究煤油在各种工况下的流动参数变化以及对流传热规律。煤油通过二级煤油加热 运输系统加热, 试验的煤油压力约 2.6 MPa ~ 5.0 MPa, 油温约 300 ~ 800 K。相应的壁面热流密度为 10 ~ 300 kW/m²。通过油温与壁温的同步测量, 结合非正常传热分析, 获得了超临界压力下、亚/超临界温度范围内煤油的流动和传热物理参量的变化曲线。

关键词: 航空煤油; 超临界态; 对流传热

中图分类号: V235.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2010) 02-0230-05

Experiment on convective heat transfer of aviation kerosene under supercritical pressures

JIANG Chen-xi, ZHONG Feng-quan, FAN Xue-jun, YU Gang

(Inst. of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, characteristics of the convective heat transfer of aviation kerosene were studied experimentally under supercritical pressure according to the conditions in a regenerative cooling system for the scramjet application. A two-stage kerosene heating system was used to heat the kerosene up to temperature of 300 ~ 800 K at pressures of 2.6 ~ 5.0 MPa. The corresponding wall heat flux varied from 10 kW/m² to 300 kW/m². By simultaneously measurements of the local fuel and wall temperatures, the heat transfer characteristics of aviation kerosene under supercritical pressures and both sub-critical and supercritical temperatures were determined using the method of unsteady heat-transfer analysis.

Key words: Aviation kerosene; Supercritical state; Convective heat transfer

1 引 言

超燃冲压发动机随着飞行马赫数的增加, 由于燃烧和气动热引起的热防护问题将显著起来。当马赫数超过 6 时, 燃烧室内总温可达到近 3 000 K, 常规的材料在没有主动冷却的情况下将难以正常工作。采用机载碳氢燃料 (如航空煤油) 作为冷却剂的再生冷却技术是解决高超声速热防护的有效方式之一^[1]。再生冷却系统中燃料通过冷却结构来冷却发动机机身, 不仅能够有效地吸收燃烧、气动热施加于机体的热量, 而且吸热后的燃料再喷注燃烧, 其燃烧性能也有显著改善^[2,3]。燃料在冷却通道中的工作压力一

般高于其临界压力 (~ 2.2 MPa), 同时, 燃料温度在吸热过程中有可能超过其临界温度 (~ 620 K)。在超临界压力下, 燃料将从过压液态直接进入超临界态, 而不经过液/气两相区。超临界态流体具有一系列特有的物性, 如类似于液体的密度, 气体的扩散性和输运特性, 以及对固体颗粒较高的溶解性^[4]。可以预期, 超临界态航空煤油的传热特性与传统流体如氮气、水等会有显著的不同。

关于煤油在超临界态下传热特性的研究不多。文献 [5] 中介绍了 RP-1 煤油的传热实验研究, 实验中煤油进口温度 290 K, 最高壁温 700 K。由于煤油的流量相对较大, 煤油在传热管道内仍处于过压液

* 收稿日期: 2009-01-15; 修订日期: 2009-04-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (10672169; 10742003; 10621202)。

作者简介: 江晨曦 (1983—), 男, 硕士, 研究领域为冲压发动机主动冷却与碳氢燃料传热。E-mail: great21C@126.com

态,因此,文献得到的传热规律与经典的管道传热公式(Dittus-Boelter公式)较吻合。文献[6]研究了超临界态 JP-7 煤油的传热特性,发现了煤油在较高温度时有传热强化现象,并对超临界态的传热强化做了尝试性解释;目前大多数传热研究仅测量了管道进出口的油温,对于管道内的油温分布往往通过一维传热分析获得。本文针对煤油传热实验,研制了可测量管道内油温的铠装热电偶,实际测量了煤油的温度分布,提高了传热分析的准确度。

本文采用煤油二级加热流动系统,对我国大庆 RP-3 航空煤油在超临界压力、温度下的对流传热特性进行了实验研究。实验压力从 2.6 MPa 到 5.0 MPa;外壁温从 300 K 到 1 000 K;油温从 300 K 到 800 K(考虑到油温超过 800 K,煤油将出现热裂解现象,所以实验中油温严格控制在 800 K 以内)。实验段采用内径 12 mm 的不锈钢管,测量了沿流向 16 个位置的油温和外壁温。同时,选取了 10 组分的煤油替代模型,并采用 NIST 开发的 Supertapp 软件^[7]对煤油的热物理性质进行了确定。根据实验数据,分析了对流传热特性,给出了传热拟和关系式。

2 实验装置

2.1 煤油加热 输运系统

如图 1 所示,传热实验采用煤油二级加热系统^[2,3]。第一级加热器由内径 10 mm,壁厚 2 mm,长度约 20 m 的不锈钢管构成,采用 5 条 960 W 的电加热带加热,加热带外包有石棉布以利于储热。每条加热带可独立控制,以达到管壁温度均匀分布。第一级加热器的温度范围为室温到 570 K,加热容量为 2 kg 煤油。第二级加热器包括传热实验段和入口、出口的流动稳定段。二级加热器由内径 12 mm,壁厚 2 mm,长约 23 m 的不锈钢管构成,管外壁包有陶瓷加热板和石棉保温层。加热系统通过 K 型热电偶测温的反馈电路控制。实验时,让第一级加热器加热后的煤油通过第二级加热器,当煤油流动在传热实验段建立平衡后,沿实验段的流向实时测量煤油温度和管外壁温度,通过控制体的能量分析,给出煤油流动、传热特性。

超临界煤油类似于气态,在一定温度、压力范围内可以加速到声速而不发生凝结,所以超临界态煤油的流量可以用声速喷管流量计控制^[8]。流量计安装在第二级加热器的下游。实验时通过控制流量计前的温度和压力来获得预期的煤油流量。

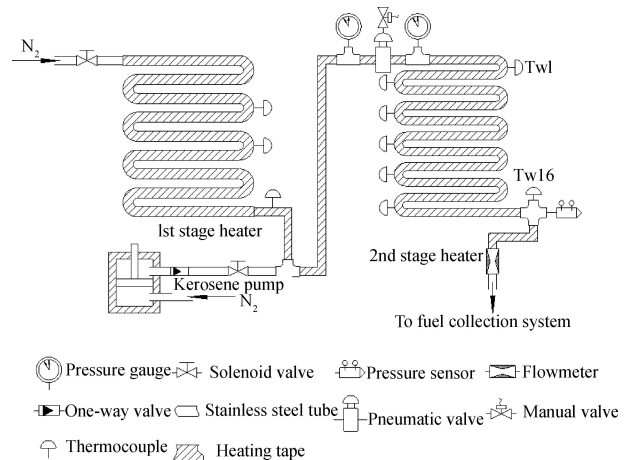


Fig. 1 Schematic diagram of kerosene flow and heating system

每次实验后,均用空气对加热管道进行“烧蚀”清洗,以减少长期运行后煤油在高温下的结碳,防止流量计或管道的堵塞。

2.2 温度测量系统

以往的文献如文献[5,6]中传热实验段的管径相对较小,无法测量油温分布,通常仅测量了进、出口油温。本文根据流动的相似原理,采用了相对较大内径的管道,同时,又确保了流动的雷诺数、普朗特数、壁面热流等参数与再生冷却系统的实际工况接近。传热实验段的结构如图 2 所示,在进出口安装了压力传感器;沿实验段分布了 16 个油温和外壁温的测量点,前 10 个测点间隔 1 m,后 6 个测点间隔 2 m。同时,在管道进、出口各有一米多的流动稳定区。本文实验的一个特色是同时测量了油温和外壁温分布,有利于提高传热分析的精度。外壁温测量是将热电偶点焊在外壁面,油温测量则采用探头直径 0.5 mm,响应时间约 0.1 s 的铠装 K 型热电偶。通过误差传递公式和实验的重复性对温度、压力测量的误差进行了分析,目前装置的温度测量误差为 ± 5 K,压力测量误差为 1%。

2.3 实验过程

为了满足设定的实验条件,可调节阀门的开闭时间,以稳定实验段进出口压力以及出口油温。图 3 给出了一个典型实验中进、出口压力随时间的变化,从第一秒开始,经过第一级加热器加热的煤油通过氮气驱动被压进实验段,由于此时实验段出口处的排空阀和收集阀都是关闭的,因此实验段的压力迅速升高,直到所需的超临界压力。在第 4 秒,排空阀打开。经过 4 秒的排空后,收集阀门打开,同时排空阀门关闭。从图中可见,在整个收集过程中(8~13 秒),进、出

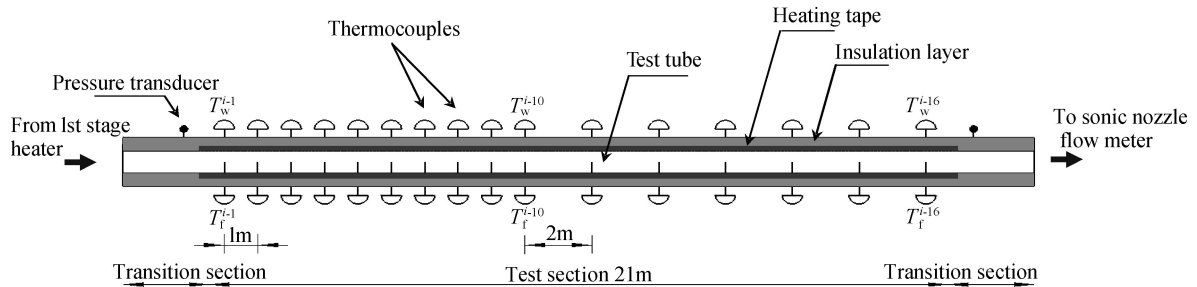


Fig. 2 Sketch of test section with temperature, pressure measurements

口压力稳定。另外,从图中发现进、出口压力的变化不大,表明实验段流动的阻力很小,实验段内压力可近似为常数。图 3 也给出了实验段的进、出口油温随时间的变化。开始时,进、出口温度大致相等,表明整个实验段内的加热较均匀。当煤油流动后,入口处温度急剧下降,而出口处油温由于从管壁吸收热量而不断上升;从第 4 秒开始,进出口油温均趋于平稳,表明管内流动、换热基本达到平衡。实验中 9~13 秒的数据将作为传热分析的数据。

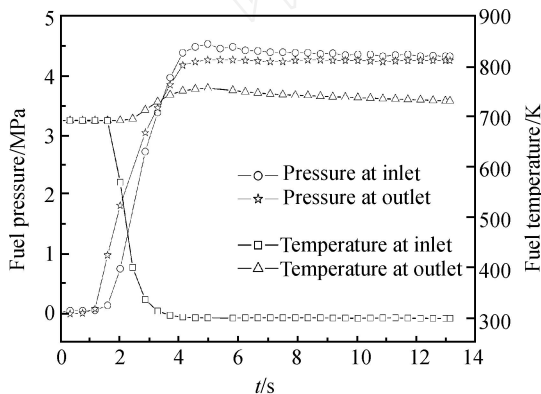


Fig. 3 Time history of fuel pressure and temperature measured at inlet and outlet of the test section

3 传热分析

在实验段管内,选取由管内壁和管道横截面组成的控制体。对控制体做质量守恒分析,可得

$$\frac{\partial}{\partial t} dV + \vec{u} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (1)$$

传热实验时,由于煤油吸热升温,其密度随时间有所变化,即式(1)左边第一项不为零。若将实验段相邻的两个测量点的横截面和管内壁表面选为控制体表面,则式(1)可写为

$$m_{i+1} = m_i - \int \rho \frac{\partial}{\partial t} dV \quad (2)$$

式中 m_i 和 m_{i+1} 分别为实验段第 i 和第 $i+1$ 测点处的质量流量; r 是管道内半径; l 是实验段第 i 和第 $i+1$ 两测点间的距离, $\frac{2}{3}l$ 是这两测点间控制体的体积。根据实验测量的温度和压力以及煤油的替代模型可计算出密度随时间的变化率。同时,在实验段出口处测量了煤油的出口流量,由式(2)可求出 16 个测点处的流量值。

对所选控制体做能量守恒分析,引用热力学第一定律,有能量守恒方程^[5]

$$\frac{\partial}{\partial t} \int e dV + \int (h + \frac{u^2}{2}) \vec{u} \cdot \vec{n} dS = - \int \vec{q}_w \cdot \vec{n} dS \quad (3)$$

这里,不考虑重力势能;另外,由等式 $h = e + P$ 可知,在压力为常数的条件下有

$$\frac{\partial(e)}{\partial t} = \frac{\partial(h)}{\partial t} \quad (4)$$

因此,式(3)可进一步写成

$$q_{wi} = \frac{(h_{i+1}m_{i+1} - h_i m_i)}{2rl} + \frac{2}{3}l \frac{\partial(h)}{\partial t} \quad (5)$$

煤油物性参数,如焓值 h ,密度 ρ ,粘性系数 μ 等随温度、压力的变化可以通过建立煤油的替代模型,调用 NIST Supertrapp 软件包来确定。本文采用了文献[9]提出的 10 组分模型。模型成份选取了包括饱和直链烃、饱和环烷烃和芳香烃的典型碳氢化合物。煤油物性参数确定后,利用式(2)可以计算出每个测量点的质量流量,再由式(5)计算出相应的热流密度。再由热流密度分布和测量的管外壁温,通过一维传热,可计算出管道内壁温,从而得出煤油管道流动的换热系数

$$h = \frac{q_{wi}}{(T_{wi} - T_{fi})} \quad (6)$$

式中 T_{wi} 是管内壁温; T_{fi} 是对应的油温。最后,通过以上所得参数可计算出努塞尔数 Nu 与普朗特数 Pr 和雷诺数 Re_d 等流动参数的关系。

4 结果和讨论

4.1 传热实验验证

首先,通过氮气的传热实验来验证实验测量和分析的可靠性。氮气传热实验时,第一级加热器保持室温,第二级加热器管壁加热到 600 K,通过改变压力和流量计口径大小来改变雷诺数。氮气传热遵循经典的 Dittus-Boelter 公式

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

由图 4 可看出,实验结果与 Dittus-Boelter 公式吻合的较好,证明了实验的可靠性。

4.2 超临界态煤油对流传热特性

传热实验的条件范围是:压力为 2.6 MPa 到 5.0 MPa;油温为 300 K 到 800 K。当油温到达 800 ~

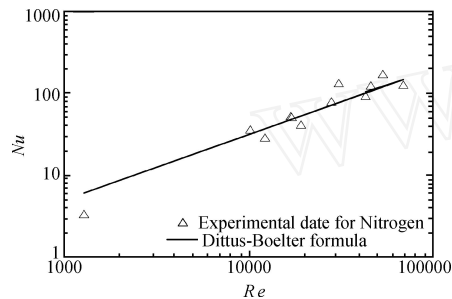


Fig. 4 Heat transfer of nitrogen flow

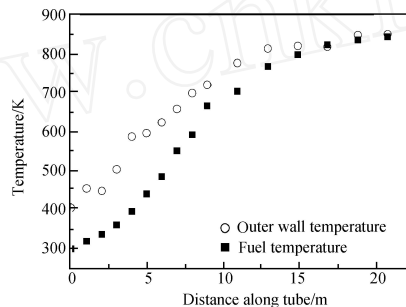


Fig. 5 Distribution of wall and fuel temperature along the tube

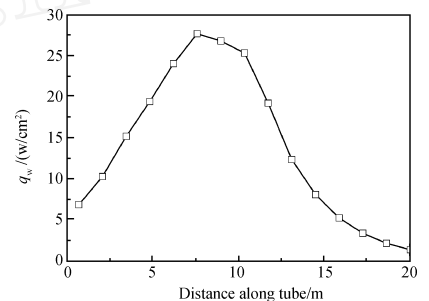


Fig. 6 Distribution of wall heat flux along the tube

图 7 为管道雷诺数的分布。如图所示,雷诺数沿管道不断增加,从入口处的仅 7 000 到出口处 400 000,增加了两个量级。这主要是由于煤油随着温度的升高,进入超临界区,其物性参数如粘性系数发生剧烈变化,从而导致了雷诺数的显著增加。研究还发现普朗特数沿流向明显减小,减小幅度有一个数量级。这些表明由于流动、传热参数发生明显变化,煤油在管道内的对流传热比氮气、水等简单物质要复杂得多。质量流量的分布如图 8 所示。由于煤油传热实验中,油温、壁温随时间变化引起的非正常效应,煤油的质量流量在管内不再是均匀分布。通过式 (2) 发现,当出口质量流量固定后,管内质量流量沿流向的反向呈增大趋势。

利用实验测得的油温和壁温,计算了对流换热系数 h ,从而得到了 Re 数和努塞尔数 Nu ($Nu = \frac{hd}{k}$) 之间的关系。图 9 给出了出口流量分别为 26 g/s 和 57 g/s 时, Nu 随 Re 数的变化。如图所示,在同一流

850 K,煤油的热裂解将显著。因此,本文的实验段管道外壁温度均控制在 850 K 以下,实验段采用了带测温反馈的加热板加热,通过改变电流大小和加热时间能调节加热的温度和均匀性。图 5 给出的是出口流量 75 g/s,第一级加热器温度为室温,第二级加热器管壁温度设为 850 K,实验第 10 秒,油温和外壁温度沿流向的分布。如图所示,煤油通过对流传热,吸收管壁的热量,其温度沿流向上升,从入口处的常温上升到临界温度,一直到接近 800 K。在管长大于 15 m 之后油温和壁温趋于相同,这表明在实验段尾部,煤油和管壁之间的对流换热已基本结束。壁面热流分布如图 6 所示,呈几字形分布。在入口处热流为 7 W/cm²,在实验段中部出现最大值 27 W/cm²,在出口处减小到仅 2 W/cm²。

量下, Nu 随雷诺数的增大出现一个台阶,在低雷诺数区域 (对应较低的油温) 和高雷诺数区域 (对应较高的油温) 有着不同的传热规律:即努塞尔数随雷诺数变化的幂次数发生改变,由 $Re^{0.83}$ 增加到 $Re^{1.5}$ 。对于不同的流量,上述现象仍然存在,只是变化曲线有所平移,但对应曲线的斜率 (雷诺数的幂次数) 基本是一样的 (0.83 和 1.5)。

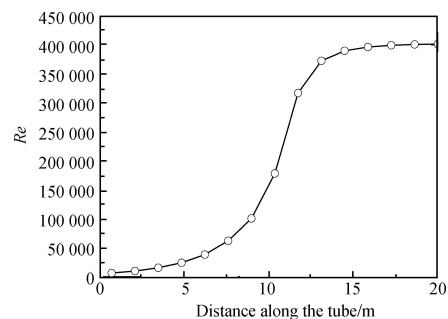


Fig. 7 Distribution of Reynolds number along the tube

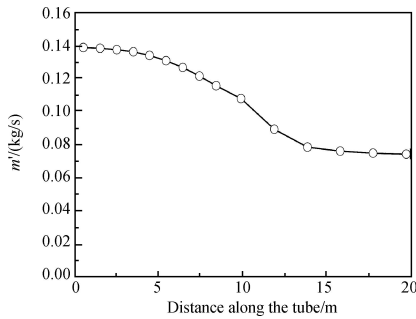


Fig. 8 Distribution of mass flow rate of kerosene

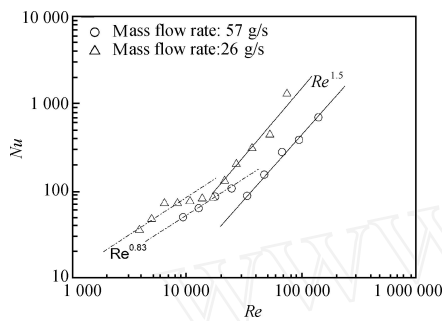


Fig. 9 Nusselt number as a function of Reynolds number at different mass flow rates

当煤油温度较低时,煤油仍处于过压液态,其遵循的努赛尔数与雷诺数的关系 $Re^{0.83}$ 基本上与 D-B 公式的 0.8 幂次数相同;但随着温度的升高,煤油进入超临界态后,其热物性有了显著变化,传热特性也发生相应改变,努赛尔数与雷诺数的关系为 $Re^{1.5}$,体现了超临界态煤油的传热增强。

5 结论

本文利用煤油加热流动系统对超临界压力下的大庆 RP-3 航空煤油的管道对流换热进行了实验研究。对管道流动的壁温和油温分布进行了测量,并选取 10 组份的煤油替代模型计算了煤油高温热物性参数。实验和传热分析的结果表明超临界压力下煤油的流动和传热比一般的物质如氮气、水要复杂。当煤油温度较低时,传热规律和经典的 Dittus-Boelter 公式给出的 $Re^{0.8}$ 较接近,但随着油温上升,传热规律发生很大变化,努赛尔数随雷诺数变化的幂次数增加为 1.5,体现了传热强化。同时,研究发现由于超临

界态煤油热物理特性的较大变化,煤油管道流动参数,如雷诺数、普朗特数均发生显著变化。本文的研究为理解和总结航空煤油的超临界对流传热规律提供了初步依据。

致谢:煤油加热系统得到了卢锡年、李英、魏雪松、王景泉和黄鹏等同志的技术支持。作者在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] Sobel D R, Spadaccini L J. Hydrocarbon fuel cooling technologies for advanced propulsion [J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1997, 119 (2): 344 ~ 351.
- [2] 范学军,俞刚. 超临界煤油超声速燃烧特性实验 [J]. *推进技术*, 2006, 27 (1). (FAN Xue-jun, YU Gang Experiments on supersonic combustion of supercritical kerosene [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27 (1).)
- [3] Fan X J, Yu G, Li J G, et al. Combustion and ignition of the thermal cracked kerosene in supersonic model combustors [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23 (2): 317 ~ 324.
- [4] Edward T, Maurice L Q. Surrogate mixtures to represent complex aviation and rocket fuels [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17 (2): 461 ~ 466.
- [5] Giovanetti A J, Spadaccini L J, Szetela E J. Deposition formation and heat transfer characteristic of hydrocarbon rocket fuels [J]. *Journal of Spacecraft*, 1985, 22 (5).
- [6] Linne D L, Meyer M L, Edwards T, et al. Evaluation of heat transfer and thermal stability of supercritical JP-7 fuel [R]. A AA 97-3041.
- [7] Ely J F, Huber M L. NIST standard reference database 4-NIST thermo physical properties of hydrocarbon mixtures [M]. *National Inst of standard, Gaithersburg, MD*, 1990.
- [8] Fan X J, Yu G, Li J G, et al. Investigation of vaporized kerosene injection and combustion in a supersonic model combustor [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22 (1): 103 ~ 110.
- [9] Zhong F Q, Fan X J, Yu G, et al. Heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions [R]. A AA 2008-4615.

(编辑:梅 瑛)