

航空煤油热物理特性实验研究

荣友战¹, 汪飞¹, 金浩¹, 侯林彤^{2,3}, 杨猛^{2,3}, 许晶禹^{2,3}

(1. 中国航空油料有限责任公司 华北公司计量检定中心, 北京 100621; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 针对广泛应用于飞机发动机的碳氢燃料,开展了 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间内的热物理特性参数实验研究。以某检定中心提供的航空煤油作为样品,测试了其在不同温度下的密度、黏度、压缩系数和膨胀系数。研究结果显示,航空煤油黏度和压缩系数与温度呈正相关,而密度与温度呈负相关,并且随着温度的增大,航空煤油膨胀系数表现为先减小后增大的趋势。在此基础上,结合标准温度下各参数的测量结果提出了密度、黏度、压缩系数和膨胀系数随温度变化的数学预测模型。研究对于航空煤油密度、黏温关系的预测误差在 10% 以内,而膨胀系数预测模型有待进一步完善。

关键词: 热物性测量; 航空煤油; 预测模型; 体积管检定

中图分类号: TB94

文献标识码: A

文章编号: 1000-1158(2024)04-0533-07

Experimental Study of Thermal and Physical Properties of Aviation Kerosene

RONG Youzhan¹, WANG Fei¹, JIN Hao¹, HOU Lintong^{2,3}, YANG Meng^{2,3}, XU Jingyu^{2,3}

(1. North China Company Metrology and Verification Center, China Aviation Fuel Co., Ltd, Beijing 100621, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Experimental studies on the thermophysical property parameters in the temperature range of $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ were carried out for hydrocarbon fuels widely used in aircraft engines. Taking aviation kerosene provided by a testing center as the test sample, its density, viscosity, compression coefficient and expansion coefficient at different temperatures were tested. The results show that the viscosity and compression coefficient of aviation kerosene are positively correlated with temperature, while the density is negatively correlated with temperature, and the expansion coefficient of aviation kerosene shows complex fluctuations with increasing temperature. In this basis, the mathematical prediction models of density, viscosity, compression coefficient and expansion coefficient with temperature were proposed by combining the measurement results of each parameter at standard temperature. The error for aviation kerosene density-temperature and viscosity-temperature relationship are within 10%, while the prediction model of expansion coefficient needs further improvement.

Key words: thermophysical property measurement; aviation kerosene; predictive model; volumetric tube calibration

1 引言

我国航空煤油系统的计量用表检定方式多为体积管,其基本原理是:当流体稳定地流经体积管和与之串联的被检表时,由置换器从体积管标准体积段置换为流体体积,经过参数修正,将其与被检表指示

值比较以确定被检表的示值误差^[1-6]。对检定过程中各影响因素进行分析,通过引入液体性质和环境条件参数(温度、液体压缩系数和膨胀系数),进一步将体积管标准段实际液体体积修正到被检表的累积流量值。不同地区,被检表承载工作介质流动温度和环境温度存在差异。因此,在流量换算过程中,着重考虑温度变化对参数修正的影响。一方面,随

着温度的改变,流体的密度和黏度发生变化,在流动过程中引起管道的压力损失变化,进而影响计量用表的漏失量^[7-10]。已有学者对流体黏度随温度的变化规律开展了研究,并定性指出了黏度变化引起流量计误差特性曲线的正向偏移^[11-13]。另一方面,流体的压缩系数和膨胀系数对温度变化比较敏感,在温度变化的同时,引起工作介质体积的相对变化量^[4,12]。

目前,针对航空煤油热物性参数的测量很少,一般以某一固定值替代,因此本文综合考虑不同温度下航空煤油的性质开展实验研究工作,定量表征温度对各参数的影响程度,并建立温度敏感模型,做出有效预测。

2 实验研究

2.1 实验方法

实验在中国科学院力学研究所的多相流实验室完成,测试样品由某计量检定中心提供,全年标定操作温度范围为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验对2种航空煤油样品进行不同温度下的密度、黏度、压缩系数和膨胀系数开展室内实验研究,实验流程见图1。

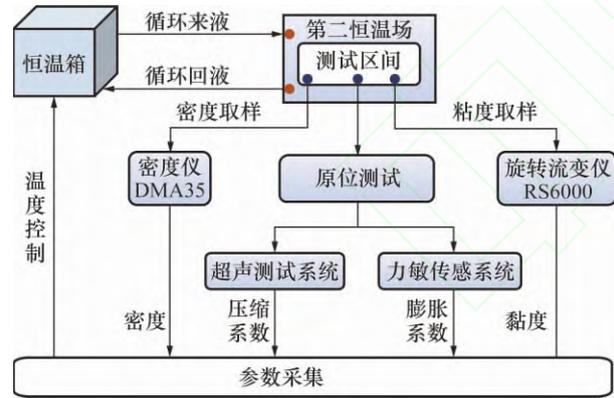


图1 实验流程图

Fig.1 Experimental flow chart

为测定样品在不同温度条件下的参数,实验选用低温恒温箱循环水浴对航空煤油样品进行温度控制,设计加工了1套循环冷却装置,冷凝介质采用标准防冻液。冷却装置由内外2个自封闭的开口容器组成,通过控制恒温容器进出口阀门,调控第二恒温场的冷却液高度并保持液面稳定,使恒温箱内液体外引形成新的循环,这种循环水浴方式在液体密度测试中较为常见^[14]。使用DMA35便携式密度仪测量航空煤油样品密度,HAAKE RS6000旋转流变仪测量样品黏度。利用超声波测速传感器和力敏传感器完成样品的压缩、膨胀系数测定,主要设备和参数如表1所示。

表1 实验设备汇总表

Tab.1 Experimental equipment summary

| 实验内容 | 实验设备 | 工作温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 误差/(%) |
|------|--------------------|--------------------------|--------|
| 温度控制 | 温控循环系统 | $-20\sim 100$ | 0.1 |
| 密度 | DMA35 密度仪 | $0\sim 100$ | 0.01 |
| 黏度 | HAAKE RS6000 旋转流变仪 | $4\sim 100$ | 0.05 |
| 压缩系数 | 超声测速系统 | $-20\sim 100$ | 0.01 |
| 膨胀系数 | 力敏传感器 | $-20\sim 100$ | 0.002 |

2.2 测试原理

2.2.1 压缩系数

液体的压强发生改变时,其体积会改变, Δp 表示压强的改变, $\Delta V/V$ 表示相应的体积的相对变化即体积应变,根据胡克定律:

$$\Delta p = -K \frac{\Delta V}{V} \quad (1)$$

式中: K 为体积模量, K 随液体种类的不同而不同。压缩系数为体积模量的倒数:

$$k = \frac{1}{K} = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (2)$$

由波动理论可知,机械波在介质中传播纵波时,其速率为:

$$v_v = \sqrt{K/\rho} \quad (3)$$

式中: ρ 为液体的密度。由式(2)和式(3)可得:

$$k = \frac{1}{K} = \frac{1}{v_v^2 \rho} \quad (4)$$

由式(4)可见,只要测量超声波在液体中的传播速度 v_v 和液体介质的密度 ρ ,就可计算出 v_v^2 和压缩系数 k ,从而实现对液体压缩系数的间接测量。

采用超声波测速传感器,测量超声波在被测液体介质中的传播时间 Δt 和距离 ΔL ,由式(5)得到声波在液体介质中传播的速度,然后由式(4)得到液体的压缩系数。

$$v_v = \Delta L/\Delta t \quad (5)$$

2.2.2 膨胀系数

基于Mattiessen的方法,用硅力敏传感器测定玻璃浮子的重量,计算航空煤油样品的膨胀系数。质量为 m 的玻璃浮子,在空气中的重力 f 为 mg ,根据输出电压与荷重成线性关系,则:

$$U = Bf \quad (6)$$

式中: B 为传感器的灵敏度。

当待测航空煤油样品的温度为 t_i ,密度为 ρ_i ,标样浸没在水中的视重为 W_i ,电压为 U_i , $i=1,2,\dots,n$, n 为样品数量。根据阿基米德原理,有:

$$mg - W_i = \rho_i V_i g \quad (7)$$

式中: V_i 为玻璃浮子在温度为 t_i 时的体积。

由于温度变化,待测介质和标样体积变化,有

$$V_n \approx V_1 [1 + \gamma'(t_n - t_1)] \quad (8)$$

$$\rho_n \approx \rho_1 [1 + \gamma(t_n - t_1)] \quad (9)$$

式中: γ' 和 γ 分别为玻璃浮子和待测航空煤油样品的膨胀系数。则:

$$\gamma = \frac{U_n - U_1}{U - U_n} \cdot \frac{1}{t_n - t_1} + \frac{U - U_1}{U - U_n} \cdot \gamma' \quad (10)$$

由于玻璃浮子的膨胀系数远小于航空煤油样品的膨胀系数,则式(10)可简化为:

$$\gamma = \frac{U_n - U_1}{U - U_n} \cdot \frac{1}{t_n - t_1} \quad (11)$$

因此,测出玻璃浮子在不同水温中的视重,即可

求得温度 t_i 时航空煤油样品的膨胀系数,利用计算机拟合测量数据,可得电压随温度变化的关系及水的膨胀系数 γ 与温度 t 的关系。

3 分析与讨论

3.1 实验结果

对2个航煤样品A和B进行了室内实验,实验在常温常压环境下进行,室内温度为15~20℃。样品测量温度区间为: -10~5℃、5~35℃以及35~40℃,实验测量结果如表2和表3所示。实验对2个样品分别进行了升温、降温测量,测量2次结果的平均值作为该温度下的测量值。

表2 航空煤油样品A测试数据

Tab.2 Test data of aero-kerosene sample A

| 温度/℃ | 粘度/mPa·s | 密度/kg·m ⁻³ | 压缩系数/MPa ⁻¹ | 膨胀系数/℃ ⁻¹ |
|------|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| -10 | 5.603 19 | 813.6 | 0.000 521 677 | 0.001 173 369 |
| -5 | 5.319 97 | 809.7 | 0.000 530 034 | 0.000 953 969 |
| 0 | 5.060 67 | 805.9 | 0.000 550 499 | 0.001 796 557 |
| +3 | 4.915 47 | 803.8 | 0.000 660 375 | 0.001 120 000 |
| +5 | 4.704 52 | 802.3 | 0.000 661 277 | 0.000 794 094 |
| +10 | 4.697 97 | 798.7 | 0.000 727 476 | 0.000 650 468 |
| +15 | 4.406 41 | 794.8 | 0.000 760 164 | 0.000 778 611 |
| +20 | 4.292 35 | 791.7 | 0.000 743 212 | 0.000 631 708 |
| +25 | 4.094 05 | 787.3 | 0.000 777 117 | 0.000 710 727 |
| +30 | 3.812 25 | 783.9 | 0.000 843 016 | 0.000 376 344 |
| +35 | 3.770 16 | 780.1 | 0.000 865 825 | 0.000 664 097 |
| +38 | 3.551 39 | 776.4 | 0.000 879 51 | 0.000 791 071 |
| +40 | 3.611 19 | 775.4 | 0.000 935 851 | 0.001 040 000 |

表3 航空煤油样品B测试数据

Tab.3 Test data of aero-kerosene sample B

| 温度/℃ | 粘度/mPa·s | 密度/kg·m ⁻³ | 压缩系数/MPa ⁻¹ | 膨胀系数/℃ ⁻¹ |
|------|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| -10 | 5.586 83 | 815.3 | 0.000 535 386 | 0.000 651 668 |
| -5 | 5.304 50 | 812.6 | 0.000 570 680 | 0.000 803 144 |
| 0 | 5.046 03 | 810.0 | 0.000 599 785 | 0.000 918 913 |
| +3 | 4.901 28 | 808.4 | 0.000 618 844 | 0.000 810 808 |
| +5 | 4.809 60 | 806.9 | 0.000 613 126 | 0.000 727 191 |
| +10 | 4.546 33 | 803.3 | 0.000 678 678 | 0.000 674 534 |
| +15 | 4.435 75 | 799.5 | 0.000 710 844 | 0.000 748 667 |
| +20 | 4.237 31 | 795.7 | 0.000 746 514 | 0.000 644 478 |
| +25 | 4.008 67 | 791.2 | 0.000 780 691 | 0.000 785 341 |
| +30 | 3.833 57 | 788.0 | 0.000 765 449 | 0.000 800 589 |
| +35 | 3.779 49 | 784.5 | 0.000 906 020 | 0.000 748 765 |
| +38 | 3.606 49 | 782.0 | 0.000 835 853 | 0.000 883 121 |
| +40 | 3.579 95 | 780.3 | 0.000 908 948 | 0.001 000 786 |

在数据分析过程中,对参数的测量误差和导出函数的误差传播进行综合评估。根据 Bevington 等提出的误差传播,对研究中由直接测量参数得出的间接测量参数进行误差分析。根据公式,假设间接测量参数为 $f = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$, 则误差传播公式定义为:

$$\sigma_f = \sqrt{\sigma_{x_1}^2 \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 + \sigma_{x_2}^2 \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 + \dots + \sigma_{x_m}^2 \left(\frac{\partial f}{\partial x_m} \right)^2} \quad (12)$$

式中: σ_f 为间接测量参数的误差; $\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \dots, \sigma_{x_m}$ 分别为直接测量参数 x_1, x_2, \dots, x_m 的误差。需要注意的是,直接测量参数的误差是通过平均值的标准误差来计算的:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x})^2}{m(m-1)}} \quad (13)$$

式中: m 为重复实验的次数; x_i 为第 j 次实验的测试值; \bar{x} 为 m 次测量结果的平均值。

3.2 实验分析

3.2.1 温度对密度的影响

图2为2种测试样品在 $-10\text{ }^\circ\text{C} \sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 区间内的密度测试结果,与温度满足线性相关。具体表现为,随着温度的增大,密度呈现线性衰减。这一实验规律与张永良等测试的柴油密度随温度变化趋势一致^[15]。并且,与范学军等对 RP-3 航空煤油在不同压力下的密度随温度变化趋势的研究吻合^[16]。

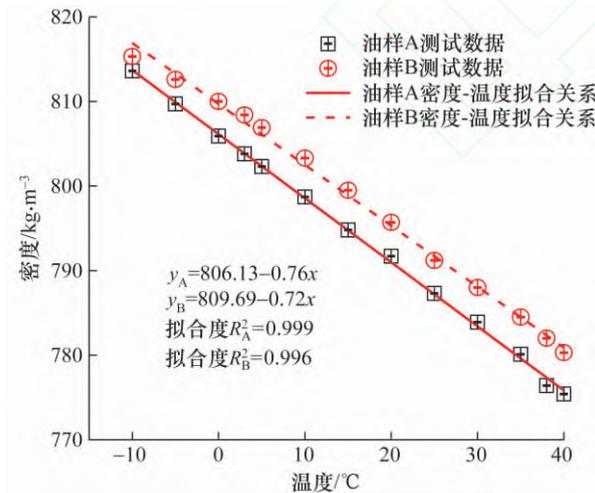


图2 航空煤油密度与温度的关系

Fig. 2 Relationship between aviation kerosene density and temperature

依据标准温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 下的密度值进行修正,拟合得到航空煤油密度的预测数学模型如下:

$$\rho_t = 1.018\rho_{20} - 9.31 \times 10^{-4}\rho_{20}t \quad (14)$$

$$\delta = (\rho_p - \rho_e) / \rho_e \times 100\% \quad (15)$$

式中: ρ_t 为温度 $t/^\circ\text{C}$ 时样品的密度, kg/m^3 ; ρ_{20} 为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时样品的密度, kg/m^3 ; δ 为密度预测的相对误差, %; ρ_p 为密度预测值, kg/m^3 ; ρ_e 为密度实测值, kg/m^3 。

结合式(14)、式(15)及实验测试数据,计算密度预测结果的相对误差,以证明密度预测模型的可信性(如图3所示)。结果表明,整体相对误差控制在 0.3% 以内,最大误差为 0.26% 。

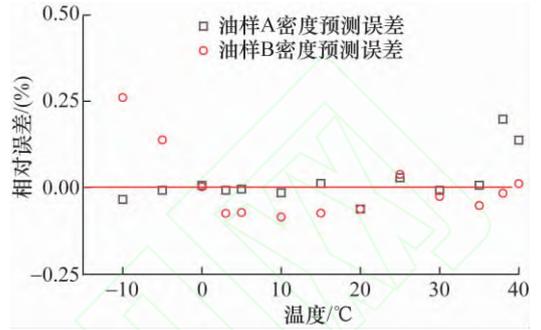


图3 航空煤油密度预测相对误差

Fig. 3 Relative error of aviation kerosene density prediction

3.2.2 温度对黏度的影响

图4显示了随着温度增加,航空煤油黏度呈指数减小的特征,这与文献[17]通过毛细管法测量 RP-3 航空煤油黏度变化规律一致。采用黏度预测关系式对航空煤油的黏度进行计算是常用方法,相应的关系式也提出了很多。Arrhenius 关系式原本用于描述化学反应中速率常数与温度之间的关系,由于该模型可以用来模拟预测烃类及烃类混合物的黏温特性,因此现已部分学者用于描述石油制品及航空煤油的黏温关系^[18~22]。本文采用式(16)所示的 Arrhenius 关系式,应用最小二乘法原理对流变实验中油样 A 和油样 B 的数据点进行了拟合,拟合结果如图4所示。图4中,散点为流变实验的结果

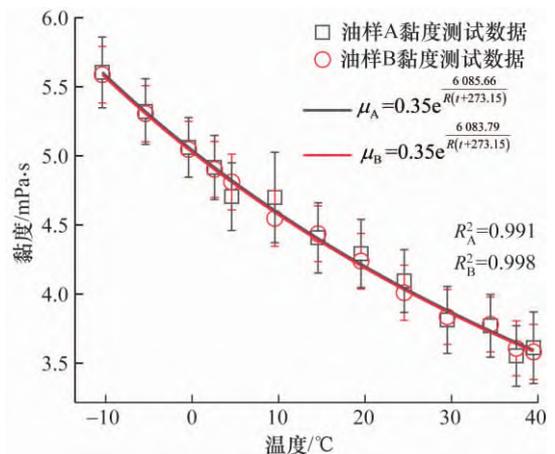


图4 航空煤油黏度与温度的关系

Fig. 4 Relationship between aviation kerosene viscosity and temperature

果,实线为拟合曲线。经拟合后拟合度 $R^2 > 0.99$, 良好的拟合度说明 Arrhenius 关系式能够用于描述航空煤油的黏温关系,这与文献 [22] 等的结论一致。

$$\mu = A e^{\frac{E}{R(t+273.15)}} \quad (16)$$

式中: A 为常数, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; E 为活化能, J/mol ; R 为气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; A 和 E 为待定参数。

依据标准温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 下的粘度值进行修正,拟合得到航空煤油的黏温数学模型如下:

$$\mu_t = 8.107 \times 10^{-2} \mu_{20} e^{\frac{1.703 \times 10^2 \mu_{20}}{273.15 + t}} \quad (17)$$

式中: μ_t 为航空煤油在温度 t 时的黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; μ_{20} 为航空煤油在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 的黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

利用式(16)并结合实验测试数据,计算粘度预测结果的相对误差,进而反映黏温模型的可信性(如图5所示)。结果表明,预测值与实测值的偏差基本控制在10%左右,式(17)所示的航空煤油黏温的数学预测模型表现出可接受的预测效果。

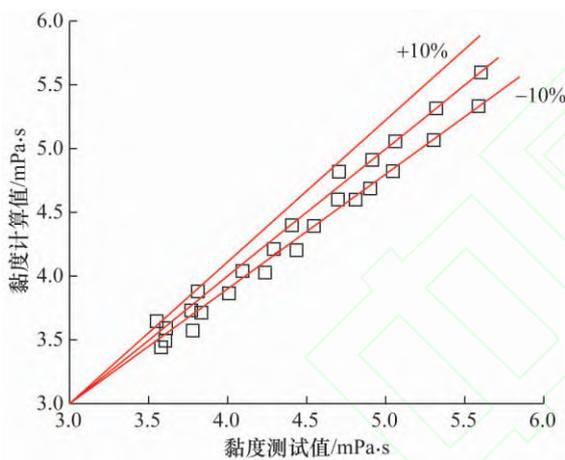


图5 航空煤油黏度计算值与实验值对比

Fig. 5 Comparison between calculated and experimental values of aviation kerosene viscosity

3.2.3 温度对压缩系数的影响

图6展示了航空煤油A、B两个样品的压缩系数与温度的变化关系。结果表明,随着温度的增大,压缩系数整体呈现增长的趋势,2种测试样品在 $-10\text{ }^\circ\text{C} \sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内压缩系数变化基本一致,这一规律与文献 [23] 中低温条件下航空喷气燃料的研究结果一致。

依据标准温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 下的粘度值进行修正,拟合得到航空煤油的压缩系数计算模型如下:

$$F_t = -1.056 \times 10^{-6} \rho_{20} \times e^{\frac{-t}{0.112\rho_{20}}} + 1.819 \times 10^{-6} \rho_{20} \quad (19)$$

式中: F_t 为温度 t 时航空煤油样品的压缩系数, MPa^{-1} ; ρ_{20} 为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 航空煤油样品的密度, kg/m^3 。

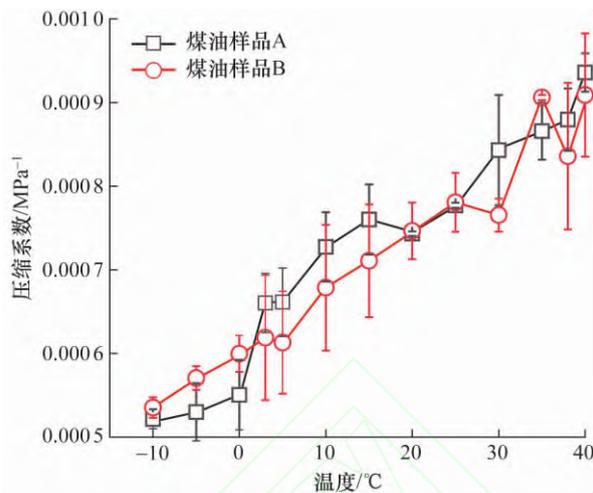


图6 航空煤油压缩系数与温度的关系

Fig. 6 Relationship between aviation kerosene compression coefficient and temperature

将实验测试结果和模型计算结果比对,如图7所示,结果显示,模型计算误差整体在10%左右,预测效果较好。

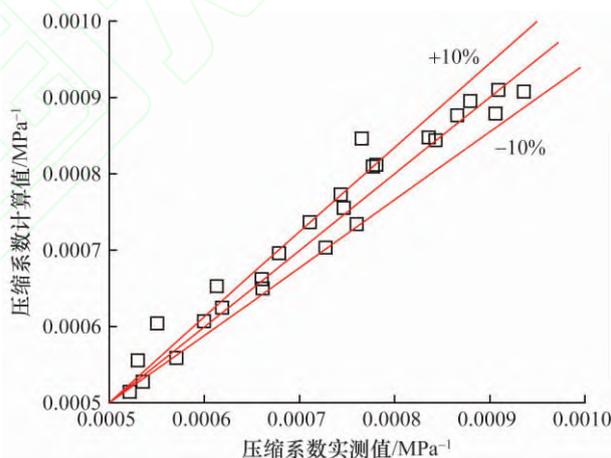


图7 航空煤油压缩系数计算值与实验值对比

Fig. 7 Comparison between calculated and experimental values of aviation kerosene compression coefficient

3.2.4 温度对膨胀系数的影响

航空煤油膨胀系数在逐渐增大的温度条件下变化特征不明显,其原因可能油品结构性质随着温度变化较为复杂,导致膨胀系数呈现波动变化,与文献 [24] 的导电流体膨胀系数研究结果相似。文献 [24] 将不同温度下的膨胀系数近似为一定值(如图8所示^[19])。参考此方法,通过常数拟合的方式确定本文研究的航空煤油膨胀系数平衡值约为 $8.22 \times 10^{-4} / \text{ }^\circ\text{C}$,如图9所示。

然而,从航空煤油膨胀系数测试结果来看,发现其在 $5 \sim 35\text{ }^\circ\text{C}$ 区间内在一定值附近波动,而在低温($-10 \sim 5\text{ }^\circ\text{C}$) 条件下随着温度的增加,膨胀系数

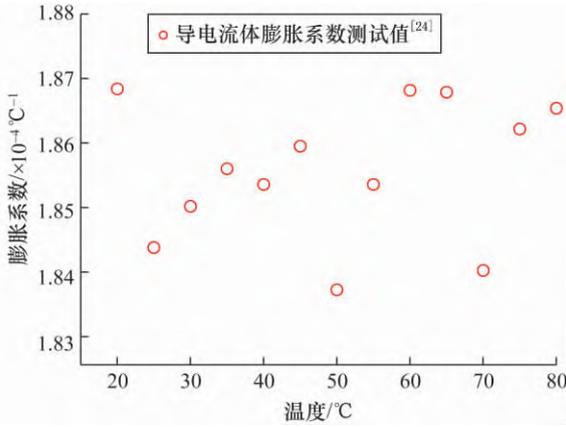


图 8 导电流体体积膨胀系数测量值

Fig. 8 Measurement of volume expansion coefficient of conductive fluid

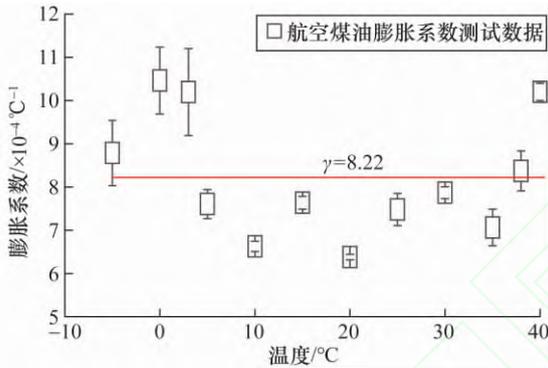


图 9 不同温度下航空煤油膨胀系数测试结果

Fig. 9 Test results of expansion coefficient of aviation kerosene at different temperatures

逐渐减小;在中高温条件下(35~40℃),随着温度升高,膨胀系数增大。因此,为了细化航空煤油膨胀系数受温度影响情况,对测试结果采用最小二乘法分段拟合,结果见式(20),膨胀系数计算结果单位为 $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 。

$$\gamma = \begin{cases} -0.19t + 9.59 & (-10 < t < 5) \\ 7.24 & (5 < t < 35) \\ 0.61t - 14.51 & (35 < t < 40) \end{cases} \quad (20)$$

基于 JJG 209-2010 体积管计量检定规程,要求检定温度需控制在 5~35℃ 之间,因此在满足规范的前提下,针对航空煤油样本可以选取 $7.24 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 。如果考虑更宽的温度范围,将实验测试结果的平均值与式(20)的计算结果比对,如图 10 所示。结果显示,计算值误差可以完全控制在 30% 以内。由于航空煤油膨胀系数受温度影响较为复杂,虽然式(20)还存在一定的局限性,但对于航空煤油膨胀系数的预测提供了思路,在此基础上增加测试点实现进一步的精准预测,进而拓宽检定温度范围。

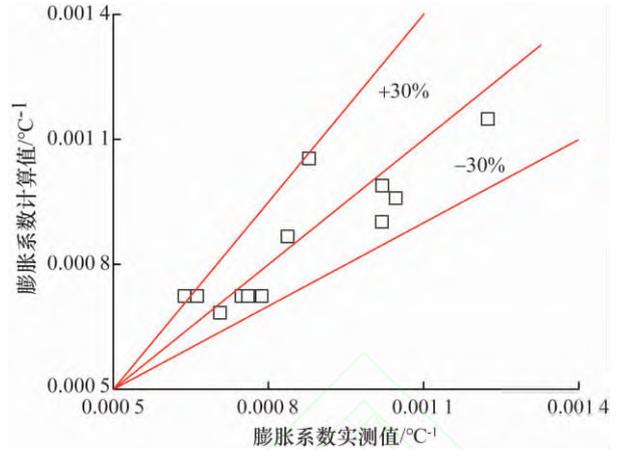


图 10 航空煤油膨胀系数计算值与实验值对比

Fig. 10 Comparison of calculated and experimental values of aviation kerosene expansion coefficient

4 结 论

为探究不同温度条件下,航空燃料计量系统受流体介质性质变化的影响。本文针对广泛应用于飞机发动机的碳氢燃料,开展了 $-10^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 温度区间内的热物理特性参数实验研究。研究测试了两种航空煤油样品在不同温度下的密度、黏度、压缩系数和膨胀系数。

研究分析表明,随着温度的增大,航空煤油黏度和压缩系数逐渐减小,密度逐渐增大,而航空煤油膨胀系数表现为先减小后增大的趋势。此外,深入分析测试结果,建立了密度、黏度、压缩系数和膨胀系数随温度变化的数学预测模型,该模型对于不同温度下航空煤油密度、黏度以及压缩系数的预测误差低于 10%;但由于温度变化,分子间距改变的敏感性受介质组分的影响较大,膨胀系数波动较为复杂,因此本文提出划分温度区间建立膨胀系数模型。将模型计算结果与实验结果比对,总体预测效果可以接受。虽然上述预测模型仍存在一定的局限性,但能够有效实现油品性质参数的温度修正,进而辅助不同地区、不同温度环境下被检表的流量检定。

[参 考 文 献]

- [1] 赵梓名. 温度计读数修正对液体容积式流量计检定结果的影响 [J]. 价值工程, 2016, 35(29): 2.
ZHAO Z M. Impact of Thermometer Readings Correction on the Calibration Results of Liquid Volumetric Flowmeter [J]. Value Engineering, 2016, 35(29): 2.
- [2] 王庆路, 谢世杰, 秦志勇. 检定温度对流量计系数及补差量的影响 [J]. 工业计量, 2005, 15(4): 41-43.

- [3] 孟祥波, 郭静, 邹德超, 等. 周期检定对质量流量计使用可靠性影响的探讨 [J]. 中国计量, 2022(5): 144 - 145.
- [4] 周立华. 石油领域外输流量计误差产生的原因及对策分析 [J]. 商品与质量, 2022(3): 82 - 84.
- [5] 李永杰. 体积管校准规范中水的膨胀系数的计算 [J]. 中国仪器仪表, 2008(8): 61 - 64.
LI Y J. The Calculation for the Expansion Coefficient of Water in the Specification of the Proving of the Pipe Prover [J]. *China Instrumentation*, 2008(8): 61 - 64.
- [6] 陈曦. 体积管检定流量计过程中存在的计量误差 [C]//计量为工业现代化服务技术报告会, 中国, 上海, 2011.
- [7] 吴冠灼, 刘灿, 黄珊, 等. 温度对容积式原油流量计检定的影响及改进措施 [J]. 中国计量, 2020(3): 3.
- [8] MILLS C. Calibrating and Operating Coriolis Flow Meters with Respect to Process Effects [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2020, 71: 10164.
- [9] 张家庆, 刘朝晖, 李宇, 等. 碳氢燃料 JP-10 高温液态黏度测量和推算模型构建方法研究 [J]. 化工学报, 2022, 73(1): 153 - 161.
ZHANG J Q, LIU Z H, LI Y, *et al.* Viscosity measurements and prediction model construction for liquid JP-10 at high-temperature conditions [J]. *CIECS Journal*, 2022, 73(1): 153 - 161.
- [10] 何云腾, 张健, 李华, 等. 比较振荡管法和比重瓶法测定 15 ~ 80℃ 原油视密度换算标准密度的研究 [J]. 计量学报, 2022, 43(5): 629 - 635.
HE Y T, ZHANG J, LI H, *et al.* Study on the Determination of Apparent Density Conversion Standard Density of Crude Oil at 1.5 ~ 80 °C by Comparing Oscillating Tube and Pycnometer Method [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2022, 43(5): 629 - 635.
- [11] 何巧伽, 何松杰. 原油管输计量中易疏忽的若干影响因素分析 [J]. 计量技术, 2007(5): 70 - 73.
- [12] 王文华, 晁宏洲. 分析原油流量计检定系统误差来源提高检定精度 [J]. 工业计量, 2004(S1): 4.
- [13] 温化冰. 原油管道容积式流量计的在线检定 [J]. 科技信息, 2011(22): 304 - 305.
- [14] 徐浩铭, 王金涛, 刘翔, 等. 基于液体静力称量法的纯水密度测量 [J]. 计量学报, 2023, 44(1): 1 - 5.
XU H M, WANG J T, LIU X, *et al.* Density Measurement of Pure Water by Hydrostatic Weighing [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2023, 44(1): 1 - 5.
- [15] 张永良, 高进胜, 纪建英, 等. 油品温度密度曲线在油流量计量中的应用 [J]. 计量技术, 2017(6): 31 - 33.
- [16] 范学军, 俞刚. 大庆 RP-3 航空煤油热物性分析 [J]. 推进技术, 2006, 27(2): 187 - 192.
FAN X J, YU G. Analysis of Thermophysical properties of Daqing RP-3 Aviation Kerosene [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27(2): 187 - 192.
- [17] 贾洲侠, 徐国强, 邓宏武, 等. 亚临界压力下航空煤油 RP-3 动力黏度测量 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(7): 934 - 938.
JIA Z X, XU G Q, DENG H W, *et al.* Dynamic Viscosity Measurements of Aviation Hydrocarbon Fuel RP-3 at Sub-critical Pressures [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(7): 934 - 938.
- [18] 陈雪娇, 侯磊, 李师瑶. 航空煤油冰点及黏温关系的分子动力学模拟 [J]. 石油科学通报, 2016, 1(3): 493 - 502.
CHEN X J, HOU L, LI S Y. Molecular Dynamics Simulation of Freezing Point and Viscosity-Temperature Relationship of Aviation Kerosene. *Petroleum Science Bulletin*, 2016, 1(3): 493 - 502.
- [19] MONDELLO M, GRETT G S, GARCIA A R, *et al.* Molecular dynamics of linear and branched alkanes: Simulations and nuclear magnetic resonance results [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1996, 105(12): 5208 - 5215.
- [20] ZHANG L Q, GREEN M L. Analyzing properties of model asphalts using molecular simulation [J]. *Energy & Fuels*, 2007, 21(3): 1712 - 1716.
- [21] MONDELLO M, GRETT G S. Viscosity calculations of n-alkanes by equilibrium molecular dynamics [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1997, 106(106): 9327 - 9336.
- [22] 金愿, 朱绚华, 乔家广. 一种黏温修正方法的研究与建立 [J]. 计量学报, 2022, 43(1): 57 - 64.
JIN Y, ZHU X H, QIAO J G. Study and Establishment of a Viscosity-temperature Correction Method [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2022, 43(1): 57 - 64.
- [23] 张志强, 郝毓雅, 陈战斌, 等. 航空喷气燃料 RP-3 体积弹性模量特性研究 [J]. 工程与试验, 2019, 59(3): 2.
ZHANG Z Q, HAO Y Y, CHEN Z B, *et al.* Research on Characteristic of Bulk Modulus of RP-3 Aviation Kerosene [J]. *Engineering & Test*, 2019, 59(3): 2.
- [24] 徐鹏程. MHD 微角振动传感器内导电流体体积膨胀系数及性能影响研究 [D]. 天津: 天津大学, 2020.



第一作者: 荣友战(1965 -), 男, 河北三河人, 中国航空油料有限责任公司华北公司工程师, 从事容量、密度计量检定方面的研究工作。

Email: rongyz@cnaf.com