

DOI: 10.7652/xjtuxb201703009

# 采用双毛细管等流量法测量 航空煤油 RP-3 的动力黏度

冯松, 毕勤成, 刘朝晖, 潘辉, 曹冬冬

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

**摘要:** 为实现超临界压力下航空煤油 RP-3 的动力黏度测量,在原双毛细管黏度计对比计算法基础上,采用等流量法并引入离心力修正系数对测试段毛细管压降进行修正,测量压力可达 10 MPa,测量温度范围提高至 306.6~673.4 K。等流量法根据上下游毛细管质量流量相等,通过测试流体在上下游毛细管中的压降关系及下游测试段毛细管热膨胀系数推算出该流体动力黏度。该方法简便可靠,在所测温度范围内的相对标准不确定度为 1.16%~2.92%。通过纯物质十二烷及质量比为 1:1 的正辛烷正庚烷二元混合物对等流量法进行标定,试验结果与文献值的相对偏差在  $\pm 2.18\%$  以内,相对偏差绝对平均值小于 0.74%。在压力为 3、4、5 MPa,温度为 306.6~673.5 K 的条件下,采用该方法测量了航空煤油 RP-3 的动力黏度。该方法的应用可为进一步提高超临界航空煤油动力黏度的测量温度范围创造条件。

**关键词:** 双毛细管;动力黏度;航空煤油 RP-3

**中图分类号:** TK123; O621.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)03-0048-06

## Viscosity Measurement of Aviation Kerosene RP-3 Using a Double-Capillary Viscometer with Equal Mass Flow

FENG Song, BI Qincheng, LIU Zhaohui, PAN Hui, CAO Dongdong

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** To measure the viscosity of the aviation kerosene RP-3, this paper proposed a new flow meter based on the double-capillary viscometer with the comparison calculation and the centrifugal effect due to coiling of the capillary being considered to revise the pressure drop of tested capillary. This calculation was applied to the measurement of viscosities of aviation kerosene at supercritical pressures up to 10 MPa and temperatures from 306.6 K to 673.5 K. The viscosity of the tested fluid is deduced through the measured relationship of the pressure drop between the upstream and downstream capillaries and the thermal expansion of the downstream capillary. The relative standard uncertainty of dynamic viscosity measurement is identified as 1.16%-2.92% within this paper's measuring range of temperatures. The n-dodecane and the binary mixtures of n-octane and n-heptane with a mass ratio of 1:1 were tested. The results showed a relative deviation within  $\pm 2.18\%$  and an absolute average relative deviation below 0.74%. The viscosity of aviation kerosene RP-3 was measured on the basis of the calibration experiments at the pressures of 3, 4 and 5 MPa and the temperatures from 306.6 K to 673.5 K.

收稿日期: 2016-07-22。 作者简介: 冯松(1989—),男,博士生;毕勤成(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21306147)。

网络出版时间: 2016-12-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161216.0923.002.html>

The method can be further extended for a larger temperature measurement range of the dynamic viscosity of aviation kerosene under supercritical pressures.

**Keywords:** two-capillary; dynamic viscosity; aviation kerosene RP-3

在超燃冲压发动机主动再生冷却技术中,航空煤油在注入燃烧室之前,作为冷却剂冷却发动机外表面,吸收多余热负荷<sup>[1-2]</sup>。因此,研究航空煤油流动传热机理,对于冷却结构设计至关重要,而获得燃料物性参数是一个先决条件。由于航空煤油成分复杂,随着温度升高还会发生剧烈化学反应等因素限制<sup>[3-5]</sup>,缺乏高温高压条件下航空煤油物性数据。双毛细管黏度计因操作简单、测量可靠,在流体黏度测量尤其是气体黏度测量方面得到了广泛应用。Berg等提出石英毛细管流动模型(QCFM),通过He气黏度测量验证了模型的准确性<sup>[6]</sup>,并进一步提出QCFM的修正系数,对He、Ar、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>、SF<sub>6</sub>等气体黏度进行测量修正,简述了各个修正系数对测量精度的影响<sup>[7]</sup>。May等在QCFM基础上提出双毛细管流动模型,分别采用对比法及等流量法完成了理想状态(温度200~400 K)下Ar的黏度测量<sup>[8]</sup>,并通过双毛细管黏度计进一步完成了H<sub>2</sub>、Xe、Ar、CH<sub>4</sub>等4种气体黏度的测量<sup>[9]</sup>。Zhang等研究了毛细管连接管路尺寸匹配对双毛细管黏度计测量精度的影响,发现连接管路尺寸不匹配会导致较大测量误差<sup>[10]</sup>。Yang等采用对比计算法将双毛细管黏度计应用到碳氢化合物及航空煤油黏度测量,测量压力为3.0~5.1 MPa,温度为293.2~523.2 K<sup>[11-12]</sup>;Liu等采用石英毛细管对环己烷和正癸烷在压力为0.1~4.0 MPa和温度为303.2~598.2 K条件下的动力黏度进行了测量<sup>[13]</sup>。双毛细管黏度计测量碳氢化合物动力黏度已经开展了一些工作,但测量温度低于600 K,进一步扩展测量温度范围,对典型航空煤油进行测量成为工作重点。

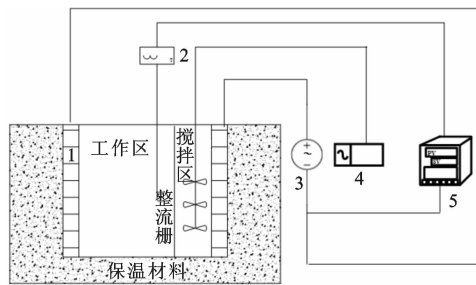
本文在原双毛细管黏度计基础上,首次采用等流量法并引入离心力修正系数对测试段毛细管压降进行修正,提高了测试精度,扩展了双毛细管黏度计测试温度范围;测试了航空煤油RP-3的动力黏度,以期为进一步提高超临界压力下航空煤油动力黏度的测量温度范围创造条件。

## 1 双毛细管黏度计测量试验系统

试验系统详见文献<sup>[11]</sup>,主要包括恒流泵、恒温系统、测量系统、毛细管路、冷凝器和背压阀。为进一步提高黏度计测量温度范围,试验时测试段毛细

管采用两套恒温系统。当测试温度在303.6~423.2 K之间时,采用导热油恒温槽;当测试温度在423.2~673.4 K之间时,采用高温熔盐恒温槽。

本文研制的高温熔盐恒温槽系统如图1所示,恒温槽尺寸为高25 cm、直径30.8 cm,其中搅拌区与工作区采用整流栅隔开,以增加恒温介质的扰动,使其温度均匀。恒温槽采用陶瓷加热带对质量比为3:2的硝酸钾、亚硝酸钠混合物进行加热,通过PID温控仪进行温度控制,控温精度为±0.1 K,当温度高于408.2 K时熔盐变成液态,继续升高温度至700 K并维持12 h,熔盐质量损失小于1.85%。由图2可知,当恒温槽温度为612.8 K时,恒温槽温度波动小于±0.1 K,满足黏度测试需求。



1:陶瓷加热圈;2:温度传感器;3:直流电源;  
4:搅拌机;5:PID温控仪

图1 高温熔盐恒温槽

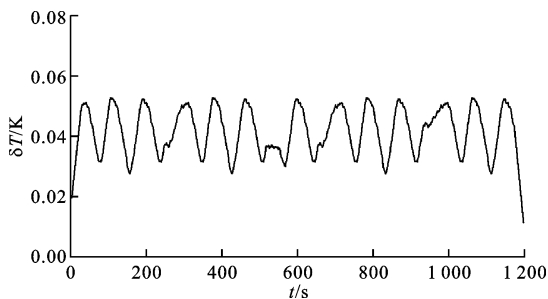


图2 恒温槽温度波动曲线

## 2 双毛细管等流量法测量原理

### 2.1 单毛细管法测量原理

一定体积的牛顿流体在一定压力梯度下通过给定毛细管时满足以下条件:不可压缩;层流稳定流动;在管壁无滑移;管子足够长,直线状、内径均匀一致。根据哈根-泊肃叶(Hagen-Poiseuille)定律,有

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\eta L} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为体积流量;  $r$  为毛细管内径;  $\Delta p$  为毛细管两端压差;  $\eta$  为动力黏度;  $L$  为测试段毛细管长度。

本文将长 3 100 mm、内径 0.25 mm 的上下游不锈钢毛细管制成螺旋半径  $R_c = 104$  mm、高  $H = 40$  mm 的螺旋盘管, 因此需要对 Hagen-Poiseuille 定律进行修正。Hagen-Poiseuille 定律修正系数包括: ①毛细管进口动能修正; ②沿毛细管管长流体膨胀修正; ③摩擦生热修正; ④毛细管壁面处滑移修正; ⑤螺旋盘管离心力修正。因为测试段毛细管有足够大的长径比, 所以忽略前 4 个修正系数, 只需要考虑螺旋盘管离心力修正。

Berg 等人在详细总结前人工作的基础上, 提出一个适用于毛细管螺旋盘管的离心力修正系数  $f_{\text{cent}}(De)^{[7]}$ , 表达式为

$$f_{\text{cent}}(De) = \left[ 1 + 16 \left( \frac{De}{De_0} \right)^4 \right]^{-1/16} \quad (2)$$

$$De = Re \left( \frac{R}{R_c} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$Re = \frac{2\rho Q}{\pi r \eta} \quad (4)$$

式中:  $De_0 = 40.58$ 。当  $De > 17$  时, 采用  $f_{\text{cent}}(De)$  对测试段毛细管压降进行修正。

通过对测试段毛细管的压差计算获得的流体动力黏度为

$$\eta = \frac{\pi R^4}{8L} \frac{\Delta p f_{\text{cent}}(De)}{Q} = \frac{\Delta p}{QZ} f_{\text{cent}}(De) \quad (5)$$

式中: 毛细管结构系数  $Z = 8L/\pi R^4$ 。

## 2.2 双毛细管等流量法实施过程

等流量法根据上下游毛细管质量流量相等, 通过测试流体在上下游毛细管中的压降关系及下游测试段毛细管热膨胀系数推算出该流体的动力黏度。采用黏度已知的标准流体流过温度  $T_0$  的恒温试验系统, 测量上下游毛细管两端压降。因流经上下游毛细管的流体质量流量相等, 由式(1)可知

$$\frac{Z_{u,T_0}}{Z_{d,T_0}} = \frac{\Delta p_{u,T_0}^r}{\Delta p_{d,T_0}^r} \quad (6)$$

式中: 上角标  $r$  代表标准流体; 下角标  $u, d$  分别代表上、下游毛细管;  $T_0$  代表流体初始温度。

测试流体依次流过上下游毛细管, 由式(5)可知

$$\eta_{T_0}^m = \eta_{T_0}^r \frac{\rho_{T_0}^m}{\rho_{T_0}^r} \frac{\Delta p_{u,T_0}^m}{\Delta p_{d,T_0}^r} \quad (7)$$

式中: 上角标  $m$  代表测试流体。由式(7)可得到测试流体在  $T_0$  温度下的动力黏度。

将下游毛细管置于恒温环境中, 测量上下游毛细管压差, 因上下游质量流量相等, 由式(5)可知

$$\frac{\eta_{T_0}^m}{\eta_{T_0}^r} = \frac{\rho_{T_0}^m}{\rho_{T_0}^r} \frac{\Delta p_{d,T}^m}{\Delta p_{d,T_0}^m} \frac{Z_{u,T_0}}{Z_{d,T}} \quad (8)$$

$$\frac{Z_{u,T_0}}{Z_{d,T}} = \frac{Z_{u,T_0}}{Z_{d,T_0}} \frac{Z_{d,T_0}}{Z_{d,T}} \quad (9)$$

$$\frac{Z_{d,T_0}}{Z_{d,T}} = \frac{L_{T_0}}{r_{T_0}^4} \frac{r_T^4}{L_T} \approx \left( 1 + \frac{\Delta L}{L} \right)^3 \approx 1 + 3 \frac{\Delta L}{L} \quad (10)$$

由式(6)~(10)得

$$\eta_T^m = \eta_{T_0}^r \left( \frac{\rho_T^m}{\rho_{T_0}^m} \right) \left( \frac{\Delta p_{d,T}^m}{\Delta p_{d,T_0}^m} \right) \left( \frac{\Delta p_{u,T_0}^r}{\Delta p_{d,T_0}^r} \right) \left( 1 + 3 \frac{\Delta L}{L} \right) \quad (11)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $\Delta L/L$  为毛细管热膨胀系数;  $\Delta p_u, \Delta p_d$  为上、下游毛细管两端压差。

## 2.3 双毛细管等流量法的优点

本文采用的双毛细管黏度计通过测试流体在上下游毛细管中压降参数间的关系, 推导流体分别在  $T$  及  $T_0$  温度下黏度的比值, 再根据  $T_0$  温度下参考流体黏度计算出待测流体在该条件下的黏度, 并考虑毛细管热膨胀系数对黏度进行修正。双毛细管黏度计较单毛细管黏度计而言, 不需要已知测试流体流量和毛细管管径、长度等几何参数, 同时也不需要毛细管进行计量常数的标定。等流量法较对比法而言, 不受已知黏度的标准流体温度、压力、测量精度的限制, 可实现更宽泛温度范围内流体黏度参数的在线测量, 具有更加广泛的应用价值。

## 3 双毛细管等流量法可靠性验证

### 3.1 毛细管参数及样品来源

测试段毛细管采用 316 不锈钢制成, 其不同温度下的热膨胀系数通过文献[14]获得。试验采用正辛烷及十二烷, 由 Aladdin 公司提供, 纯度(质量分数)分别为 99.5%、99%。试剂在试验前未经进一步提纯。航空煤油 RP-3 在黏度测试前采用 Agilent GC6890-MS5973 对其成分的质量分数进行分析, 其中链烷烃为 52.4%, 烯烃为 7.66%, 苯系物为 18.55%, 环烷烃为 15.49%, 萘为 4.41%, 其他为 1.49%。将成分分析的详细结果与文献[15]中航空煤油 RP-3 的分析结果进行对比, 发现同种型号不同批次航空煤油的成分差异很小。航空煤油 RP-3 (临界点  $p_c = 2.33$  MPa,  $T_c = 645.04$  K<sup>[16]</sup>) 在 3、4、5 MPa 压力下对应的拟临界温度分别为 669.83、669.88、716.57 K。

3.2 等流量法标定试验

在对测量装置进行标定的过程中,本文首先对  $T=303.2\sim 673.2\text{ K}$ 、 $p=5.10\text{ MPa}$  的十二烷的动力黏度进行了测量,结果如表 1 所示。十二烷黏度测量值与 NIST REFPROP version 9.0 参考值相比,最大相对偏差为 2.18%,相对偏差绝对平均值为 0.74%。

表 1 十二烷动力黏度测量值与参考值对比

| $T/\text{K}$ | $\eta_{\text{exp}}/\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ | $\eta_{\text{lit}}/\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ | $\Delta\eta\cdot\eta_{\text{lit}}^{-1}/\%$ |
|--------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 303.2        | 1 333.5                                       | 1 323.4                                       | 0.76                                       |
| 313.2        | 1 122.1                                       | 1 126.5                                       | -0.39                                      |
| 323.0        | 970.0                                         | 972.7                                         | -0.27                                      |
| 333.1        | 851.9                                         | 850.0                                         | 0.22                                       |
| 343.3        | 744.2                                         | 750.6                                         | -0.85                                      |
| 353.3        | 673.6                                         | 668.6                                         | 0.75                                       |
| 363.2        | 607.5                                         | 600.0                                         | 1.24                                       |
| 373.3        | 546.7                                         | 542.0                                         | 0.86                                       |
| 383.2        | 490.2                                         | 492.4                                         | -0.46                                      |
| 393.2        | 447.2                                         | 449.5                                         | -0.52                                      |
| 403.2        | 411.2                                         | 412.1                                         | -0.23                                      |
| 413.2        | 378.5                                         | 379.2                                         | -0.18                                      |
| 423.2        | 350.8                                         | 349.9                                         | 0.25                                       |
| 433.2        | 327.7                                         | 323.8                                         | 1.19                                       |
| 443.4        | 297.4                                         | 300.3                                         | -0.96                                      |
| 453.1        | 282.2                                         | 279.1                                         | 1.14                                       |
| 463.2        | 260.4                                         | 259.7                                         | 0.28                                       |
| 473.2        | 244.0                                         | 242.0                                         | 0.84                                       |
| 483.1        | 225.0                                         | 225.7                                         | -0.33                                      |
| 493.2        | 207.6                                         | 210.7                                         | -1.47                                      |
| 503.2        | 196.4                                         | 196.8                                         | -0.19                                      |
| 513.1        | 184.6                                         | 183.8                                         | 0.42                                       |
| 523.2        | 172.2                                         | 171.7                                         | 0.29                                       |
| 533.1        | 160.8                                         | 160.4                                         | 0.27                                       |
| 543.2        | 148.9                                         | 149.8                                         | -0.60                                      |
| 553.2        | 137.5                                         | 139.8                                         | -1.66                                      |
| 563.2        | 129.7                                         | 130.4                                         | -0.51                                      |
| 573.2        | 120.1                                         | 121.5                                         | -1.17                                      |
| 583.3        | 112.6                                         | 113.1                                         | -0.38                                      |
| 593.2        | 103.1                                         | 105.1                                         | -1.92                                      |
| 603.2        | 97.4                                          | 97.5                                          | -0.08                                      |
| 613.2        | 91.3                                          | 90.3                                          | 1.12                                       |
| 623.1        | 83.9                                          | 83.5                                          | 0.43                                       |
| 633.2        | 76.7                                          | 77.1                                          | -0.51                                      |
| 643.1        | 69.4                                          | 70.9                                          | -2.18                                      |
| 653.2        | 65.7                                          | 65.2                                          | 0.80                                       |
| 663.2        | 60.5                                          | 59.7                                          | 1.43                                       |
| 673.2        | 55.1                                          | 54.6                                          | 1.02                                       |

为进一步验证试验系统可靠性,采用称量法,将质量比为 1:1 的正庚烷-正辛烷的混合流体作为标准物对双毛细管黏度计进行检验,在超临界压力 5 MPa、温度测量范围 303.2~593.2 K 内,最大相对偏差为 1.43%,相对偏差绝对平均值为 0.58%,其中 303.2~493.3 K 的数据文献[11]已给出,503.3~593.2 K 的黏度测量值与 REFPROP version 9.0 的参考值如表 2 所示。REFPROP version 9.0 的计算值与文献[17-20]测量值的平均绝对偏差为 0.53%,最大偏差为 2.71%。

表 2 正辛烷与正庚烷二元混合物动力黏度测量值与文献参考值的对比

| $T/\text{K}$ | $\eta_{\text{exp}}/\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ | $\eta_{\text{lit}}/\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ | $\Delta\eta\cdot\eta_{\text{lit}}^{-1}/\%$ |
|--------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 503.3        | 91.6                                          | 91.3                                          | 0.28                                       |
| 513.2        | 84.8                                          | 84.7                                          | 0.05                                       |
| 523.2        | 77.3                                          | 78.4                                          | -1.37                                      |
| 533.1        | 71.8                                          | 72.3                                          | -0.63                                      |
| 543.2        | 65.8                                          | 66.3                                          | -0.73                                      |
| 553.2        | 60.3                                          | 60.4                                          | -0.07                                      |
| 563.2        | 54.7                                          | 54.6                                          | 0.30                                       |
| 573.2        | 49.5                                          | 48.8                                          | 1.35                                       |
| 583.1        | 43.8                                          | 43.2                                          | 1.43                                       |
| 593.2        | 37.7                                          | 37.8                                          | -0.28                                      |

4 试验不确定度分析

根据式(11),计算所测黏度的相对合成标准不确定度

$$\begin{aligned} u_r^2(\eta_T^m) &= u_r^2(\eta_{T_0}^m) + u_r^2(\rho_T^m) + u_r^2(\rho_{T_0}^m) + \\ &u_r^2(\Delta p_{d,T}^m) + u_r^2(\Delta p_{u,T_0}^m) + u_r^2(\Delta p_{r,T_0}^m) + \\ &u_r^2(\Delta p_{d,T_0}^r) + 9u_r^2\left(\frac{\Delta L}{L}\right) + \left[\frac{\partial \eta_T^m}{\partial T} \frac{u(T)}{\eta_T^m}\right]^2 + \\ &\left[\frac{\partial \eta_{T_0}^m}{\partial T_0} \frac{u(T_0)}{\eta_{T_0}^m}\right]^2 + \left[\frac{\partial \eta_p}{\partial p} \frac{u(p)}{\eta_T^m}\right]^2 \end{aligned} \tag{12}$$

压差传感器量程为 0~248 kPa,压差的标准不确定度为±0.19 kPa;压力传感器量程为 0~10 MPa,标准不确定度为±0.03 MPa;流体温度测量采用 K 型铠装热电偶,温度范围为 303.2~673.2 K,标准不确定度为±0.5 K;测试毛细管热膨胀系数的相对标准不确定度小于±0.2%;恒流泵量程为 0.001~9.999 mL/min,标准不确定度为±0.010 mL/min;RP-3 的密度参考文献[21]的测量值,相对标准不确定度为 0.635%。经计算获得测量黏度的相对合成标准不确定度为 1.16%~2.92%。

5 航空煤油 RP-3 动力黏度测试结果

本文对航空煤油 RP-3 在压力为 3、4、5 MPa, 温度为 306.6~673.5 K 时的动力黏度进行了测量, 结果如表 3 及图 3 所示, 并与文献值<sup>[15]</sup>进行了比较,

表 3 航空煤油 RP-3 动力黏度测量值

| $p=3\text{ MPa}$ |                                               | $p=4\text{ MPa}$ |                                               | $p=5\text{ MPa}$ |                                               |
|------------------|-----------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|
| $T/\text{K}$     | $\eta_{\text{exp}}/\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ | $T/\text{K}$     | $\eta_{\text{exp}}/\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ | $T/\text{K}$     | $\eta_{\text{exp}}/\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ |
| 315.1            | 813.2                                         | 309.0            | 915.8                                         | 306.6            | 963.1                                         |
| 324.8            | 712.1                                         | 315.6            | 833.4                                         | 314.5            | 850.2                                         |
| 333.7            | 636.1                                         | 326.4            | 720.1                                         | 323.9            | 740.7                                         |
| 344.2            | 563.4                                         | 336.6            | 633.6                                         | 333.9            | 651.1                                         |
| 354.3            | 506.0                                         | 345.4            | 573.4                                         | 343.5            | 582.6                                         |
| 364.2            | 457.6                                         | 354.8            | 518.5                                         | 353.6            | 522.0                                         |
| 373.8            | 416.7                                         | 365.1            | 467.5                                         | 363.5            | 471.6                                         |
| 384.2            | 378.0                                         | 374.3            | 427.6                                         | 373.6            | 428.1                                         |
| 393.9            | 346.7                                         | 383.8            | 391.0                                         | 383.5            | 390.9                                         |
| 404.2            | 317.2                                         | 394.2            | 356.3                                         | 394.1            | 356.5                                         |
| 414.3            | 292.0                                         | 404.0            | 327.6                                         | 403.7            | 329.3                                         |
| 424.1            | 269.6                                         | 414.1            | 301.2                                         | 414.1            | 303.2                                         |
| 434.2            | 248.7                                         | 424.2            | 277.6                                         | 424.3            | 279.6                                         |
| 444.1            | 230.1                                         | 434.0            | 257.3                                         | 434.1            | 259.4                                         |
| 454.4            | 212.4                                         | 444.3            | 237.5                                         | 444.0            | 240.7                                         |
| 464.3            | 196.9                                         | 453.7            | 221.0                                         | 453.8            | 223.5                                         |
| 474.2            | 182.4                                         | 463.8            | 204.8                                         | 464.0            | 207.2                                         |
| 483.6            | 169.9                                         | 474.0            | 189.3                                         | 473.9            | 192.5                                         |
| 493.8            | 156.9                                         | 483.5            | 176.2                                         | 483.5            | 179.7                                         |
| 503.0            | 147.2                                         | 493.7            | 163.0                                         | 493.5            | 167.4                                         |
| 514.3            | 134.7                                         | 503.6            | 151.2                                         | 502.7            | 158.1                                         |
| 524.5            | 125.1                                         | 513.2            | 138.7                                         | 513.4            | 145.9                                         |
| 534.4            | 115.5                                         | 523.2            | 129.1                                         | 523.7            | 136.4                                         |
| 544.5            | 106.5                                         | 533.1            | 119.2                                         | 533.7            | 126.6                                         |
| 554.9            | 98.0                                          | 543.8            | 109.1                                         | 543.9            | 117.1                                         |
| 564.8            | 90.7                                          | 553.8            | 101.2                                         | 553.7            | 108.6                                         |
| 574.8            | 83.6                                          | 563.8            | 93.9                                          | 563.9            | 100.5                                         |
| 584.7            | 74.6                                          | 573.6            | 86.8                                          | 573.8            | 93.4                                          |
| 595.0            | 69.3                                          | 583.4            | 77.9                                          | 583.5            | 87.4                                          |
| 605.1            | 64.5                                          | 593.8            | 71.8                                          | 593.8            | 81.6                                          |
| 615.2            | 58.7                                          | 603.3            | 67.6                                          | 603.8            | 76.2                                          |
| 625.5            | 52.9                                          | 614.0            | 61.7                                          | 613.9            | 71.1                                          |
| 635.5            | 46.3                                          | 623.7            | 56.6                                          | 623.6            | 65.3                                          |
| 646.2            | 32.2                                          | 633.8            | 50.6                                          | 634.0            | 59.7                                          |
| 654.3            | 25.2                                          | 643.7            | 44.8                                          | 643.8            | 55.0                                          |
| 664.0            | 21.6                                          | 653.5            | 36.6                                          | 654.0            | 51.3                                          |
| 673.4            | 20.7                                          | 663.5            | 33.6                                          | 664.0            | 47.2                                          |
|                  |                                               | 673.5            | 28.6                                          | 673.4            | 42.5                                          |

误差分布如图 4 所示。结果表明,测量值与文献值对比,最大相对偏差为 9.98%,相对偏差绝对平均值为 2.24%。但是,当温度大于 550 K 后,测试值与文献值相对偏差逐渐增大。造成这种现象的主要原因是:①文献值也是测量值,本身存在误差,文献值越接近临界点偏差越大,造成本文测量值与文献值越接近拟临界温度偏差越大;②随着温度的升高,测试段毛细管压降减小,导致压降相对偏差升高;③在临界点附近,温度升高,密度迅速减小,导致黏度也随之迅速减小,在很小的温度区间内,黏度值发生大幅度变化,导致测量误差急剧增加;④在保证层流流动条件( $Re<1\ 500$ )下,Dean 数增大,测试段螺旋盘管二次流影响增大,导致测量误差增加。在高压条件下,航空煤油流动更加稳定,更有利于黏度测量。

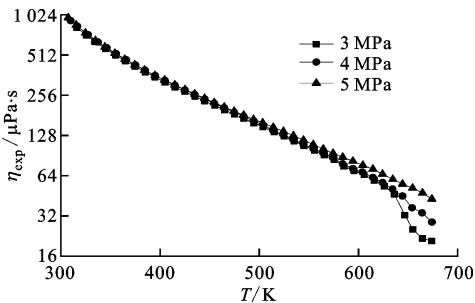


图 3 航空煤油 RP-3 动力黏度测量曲线

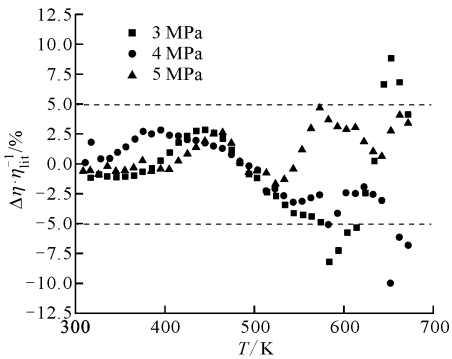


图 4 航空煤油 RP-3 动力黏度测量值与文献值的偏差

6 结 论

本文采用双毛细管黏度计等流量法,通过纯物质十二烷及质量比为 1:1 的正辛烷正庚烷二元混合物的黏度测试,验证了该方法的可靠性。试验结果表明,黏度测量的最大相对偏差在±2.18%以内,相对偏差绝对平均值小于 0.74%。在此基础上,对压力为 3、4、5 MPa,温度为 306.6~673.5 K 下的航空煤油 RP-3 的动力黏度进行测量,并与文献值<sup>[15]</sup>进行对比,最大相对偏差为 9.98%,相对偏差绝对平

均值为 2.24%。该方法的应用可为进一步提高双毛细管黏度计的测量温度范围创造条件。

### 参考文献:

- [1] FRY R S. A century of ramjet propulsion technology evolution [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2004, 20(1): 27-58.
- [2] ZHONG Fengquan, FAN Xuejun, YU Gong, et al. Heat transfer of aviation kerosene at supercritical condition [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2009, 23(3): 543-550.
- [3] EDWARDS T. Cracking and deposition behavior of supercritical hydrocarbon aviation fuels [J]. *Combustion Science and Technology*, 2006, 178(1/2/3): 307-334.
- [4] HOU Lingyu, DONG Ning, SUN Dapeng. Heat transfer and thermal cracking behavior of hydrocarbon fuel [J]. *Fuel*, 2013, 103: 1132-1137.
- [5] LIU Zhaohui, BI Qincheng, GUO Yong, et al. Hydraulic and thermal effects of coke deposition during pyrolysis of hydrocarbon fuel in a mini-channel [J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(6): 3672-3679.
- [6] BERG R F. Quartz capillary flow meter for gases [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(3): 772-779.
- [7] BERG R F. Simple flow meter and viscometer of high accuracy for gases [J]. *Metrologia*, 2005, 42(1): 11-23.
- [8] MAY E F. Transport properties of argon at zero density from viscosity-ratio measurements [J]. *Metrologia*, 2006, 43(3): 247-258.
- [9] MAY E F, MOLDOVER M R, BERG R F, et al. Reference viscosities of H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, Ar, and Xe at low densities [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2007, 28(4): 1085-1110.
- [10] ZHANG Jintao, LIN H, CHE J. Effects of connecting tubing on a two-capillary viscometer [J]. *Metrologia*, 2013, 50(4): 377-384.
- [11] 杨竹强, 冯松, 潘辉, 等. 双毛细管式碳氢化合物黏度测量方法研 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(7): 37-41.  
YANG Zhuqiang, FENG Song, PAN Hui, et al. Viscosity measurement of hydrocarbons using a two-capillary viscometer [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(7): 37-41.
- [12] YANG Zhuqiang, LIU Zhaohui, BI Qincheng, et al. Viscosity measurements of hydrocarbon fuel at temperatures from (303.2 to 513.2) K and pressures up to 5.1 MPa using a two-capillary viscometer [J]. *Thermochimica Acta*, 2015, 617(10): 1-7.
- [13] LIU Zhaohui, TRUSLER J P M, BI Qincheng. Viscosities of liquid cyclohexane and decane at temperatures between (303 and 598) K and pressures up to 4 MPa measured in a dual-capillary viscometer [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2015, 60(8): 363-370.
- [14] KIM C S. Thermophysical properties of stainless steels [M]. Illinois, USA: Argonne National Laboratory, 1975: 1-24.
- [15] DENG H W, ZHANG C B, XU G Q, et al. Viscosity measurements of endothermic hydrocarbon fuel from (298 to 788) K under supercritical pressure conditions [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2012, 57(2): 358-365.
- [16] DENG Hongwu, ZHANG Chunben, XU Guoqiang, et al. Visualization experiments of a specific fuel flow through quartz-glass tubes under both sub- and supercritical conditions [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2012, 25(3): 372-380.
- [17] KNAPSATAD B. Viscosity of three binary hydrocarbon mixtures [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 1991, 36: 84-88.
- [18] DYMOND J H, YOUNG K J. Transport properties of nonelectrolyte liquid mixtures: I Viscosity coefficients for n-alkane mixtures at saturation pressure from 283 to 378 K [J]. *International Journal of Thermophysics*, 1980, 1(4): 331-344.
- [19] CAUDWELL D R. Viscosity measurements on dense fluid mixtures [D]. London, UK: Imperial College, 2004: 25-27.
- [20] LYUSTERNIK V E, ZHDANOV A G. Physical constants and properties of substances [M]. Moscow, Russia: Standards Publishing, 1973: 214-225.
- [21] DENG H W, ZHANG C B, XU G Q, et al. Density measurements of endothermic hydrocarbon fuel at sub- and supercritical conditions [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2011, 56(6): 2980-2986.

(编辑 荆树蓉)