

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.05.001

# 导热油黏温关系的实验研究

寇广孝, 尹 湘, 王柳磊, 符 涛

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 以 VM4100 高温黏度计和 DM2000 高温密度计搭建了最高实验温度为 350 ℃ 的导热油黏度测量平台, 并以其测定了 T66 和 S750 标准导热油样品及其混合液在不同温度区间的黏度值。T66 和 S750 标准导热油样品的黏度测量误差分别为 4.55% 和 3.90%, 均在 5% 以内, 表明 VM4100 高温黏度计可被用于导热油黏度的工程测量。对标准导热油样品实测黏度值进行了回归分析, 拟合所得黏度-温度关系式计算误差在 9% 以内, 计算精度较高, 表明该关系式可用来预测高温导热油的黏度值。且以实验验证了导热油混合液黏度可按质量成分进行加权计算。

**关键词:** 导热油; 高温; 黏度

**中图分类号:** TF8

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2018)05-0001-05

## An Experimental Study on the Viscosity-Temperature Relationship of the Heat Transfer Oil

KOU Guangxiao, YIN Xiang, WANG Liulei, FU Tao

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** With the aid of a VM4100 high temperature viscometer and DM2000 high temperature densimeter, the viscosity measurement platform of heat transfer oil has been established, with the highest experimental temperature being 350 ℃. The measurement of viscosity values of standard heat conducting oil samples T66 and S750 and their mixed liquids in different temperature ranges thus can be achieved. The errors of viscosity measurement of standard thermal conductive oil samples of T66 and S750 are 4.55% and 3.90%, each less than 5%, which indicates that a VM4100 high temperature viscometer can be applied for the engineering measurement of thermal conductive oil viscosity. A regression analysis has been made of the measured viscosity value of the standard heat transfer oil sample, with the calculation error of the viscosity-temperature relationship being less than 9%. The relatively high calculation accuracy indicates that the formula can be used to predict the viscosity of heat transfer oil within high temperature range, and the experiment verifies the fact that the viscosity of the heat transfer oil mixture can be calculated by weight according to the mass composition.

**Keywords:** heat transfer oil; high temperature; viscosity

## 0 引言

有机热载体炉是一种以导热油为传热介质且具

有低压高温特性的新型特种加热炉, 其液相炉工作温度可高达 340 ℃<sup>[1]</sup>, 因而可被广泛应用于间接加热的

收稿日期: 2018-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51346007)

作者简介: 寇广孝(1962-), 男, 陕西礼泉人, 湖南工业大学教授, 硕士生导师, 主要从事建筑节能技术和有机热载体加热技术等领域的教学和科研工作, E-mail: gxkou@sina.com

生产工艺或供热工程中,在高温间接加热场合其优点更加突出。

黏度作为导热油最重要的物性参数之一,对有机热载体炉的设计、运行与维护起着重要作用<sup>[2-4]</sup>。过去多年里,因为受到导热油黏度计测量温度范围不能超过120℃的限制,无法通过试验测定温度范围超出120℃的导热油的黏度值。但是近年来,国内某公司开发的基于振动法原理测量导热油黏度的VM4100型高温黏度计,其最高测量温度可达350℃,这为高温区间导热油黏度的测量提供了条件。因此,本研究拟通过实验测定两种单一标准导热油及其混合液在高温区间的黏度,分析其黏度随温度的变化情况,建立黏温关系式,并将其与预测模型进行对比,以得到计算精度更高的导热油黏温模型<sup>[5]</sup>,以期液相有机热载体炉及其供热系统的设计提供参考。

## 1 实验仪器及其测量原理

### 1.1 实验仪器

VM4100型高温黏度计以液体密度为基础测量黏度,具有测量速度较快、测量精度较高、操作便捷、自动化程度较高以及样品用量较少等优点,可以被广泛地应用于导热油黏度的测量中。该黏度计的系统构成主要包括温度控制器、数据采集电路、信号发生器、平流泵、冷却器、温度计和高温阀等,如图1所示。

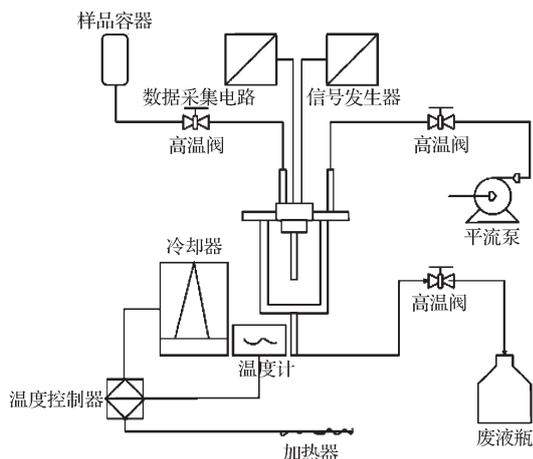


图1 黏度计构成示意图

Fig. 1 Diagram of viscometer composition

为了提高实验数据的精确度,采用DM2100型高温密度计测量同一环境下的导热油密度,该密度计可被用于测量0~1 MPa压力下、10~350℃温度范围内的物质密度。DM2100型密度计的系统构成主要包括控制检测系统、精密天平、高温阀、加热器、冷却器等,如图2所示。

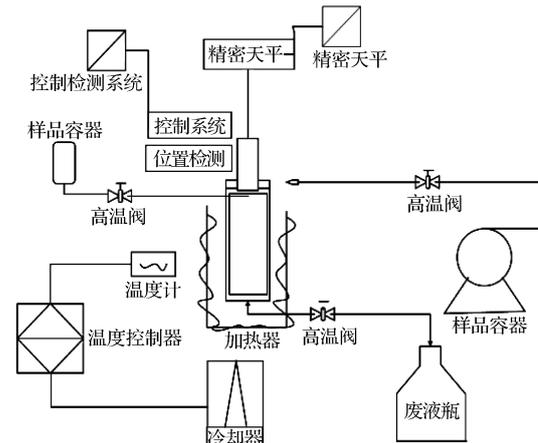


图2 密度计系统构成示意图

Fig. 2 Diagram of densimeter composition

### 1.2 测量原理

VM4100型高温黏度计以振动弦测黏度法为基本工作原理,选用电阻率较大、强度较好的钨丝做为振动弦,在被测黏性流体中做受迫振动。其中,钨丝振动所需要的磁场由平行放置的磁铁提供。在受迫振动模式下,钨丝的横向振动运行速度 $v$ 可以用如下公式表示:

$$v = \frac{F(z)e^{i\omega t}}{m_s [\omega(\beta' + 2A_s) + i\omega(1 + \beta) + \omega_s^2 / i\omega]}。$$

式中: $F(z)$ 为驱动电流在金属丝单位长度上产生的幅值,它是丝长 $z$ 的函数;

$e^{i\omega t}$ 为振动方程的复变函数, $i$ 为虚数单位,运行速度 $v$ 通过拟合迭代求解得出。

$m_s$ 为单位长度丝的质量,其定义式为 $m_s = \rho_s \pi R^2$ ,其中 $\rho_s$ 为金属丝的密度, $R$ 为金属丝的界面半径;

$\omega$ 和 $\omega_s$ 分别为流体的振动速度和金属丝的振动速度;

$A_s$ 为丝的内部阻尼系数;

$\beta$ 和 $\beta'$ 为由流体加速度形成的附加质量和流体的黏性阻尼。

流体加速度形成的附加质量和流体的黏性阻尼的定义式如下:

$$\beta = (\rho / \rho_s)k, \quad \beta' = (\rho / \rho_s)k'。$$

式中: $\rho$ 为流体的密度;

$k$ 的定义式为 $k = -1 + 2lm(A)$ ;

$k'$ 的定义式为 $k' = \text{Re}(A)$

且 $A = i \left( 1 + \frac{2K_1(\sqrt{i\Omega})}{\sqrt{i\Omega}K_0(\sqrt{i\Omega})} \right)$ , 式中, $K_0(z)$ 和 $K_1(z)$ 分别为修正 Bessel 函数, $\Omega$ 为金属丝内部阻力,且

$\Omega = (\rho\omega R^2) / \mu$ , 其中 $\mu$ 为流体动力黏度。

DM2100 型高温密度计的基本原理为阿基米德定律, 即浸没于流体中的物体受到的浮力大小等于该物体排开的流体质量, 其核心部件是一种新型的磁悬浮控制系统。

被测流体的密度  $\rho$  可用式 (1) 表示:

$$\rho = \frac{m_s - m_s^*}{V_m(T, P)} \quad (1)$$

式中:  $m_s$  为悬浮系统和称块的总质量;

$m_s^*$  为悬浮系统质量;

$V_m(T, P)$  为实验温度和压力下称块排出的液体的体积。

## 2 实验样品及测温范围

实验选用某知名品牌 T 型导热油 T55、T66 和 S 型导热油 S700、S718 和 S750 作为实验样品。

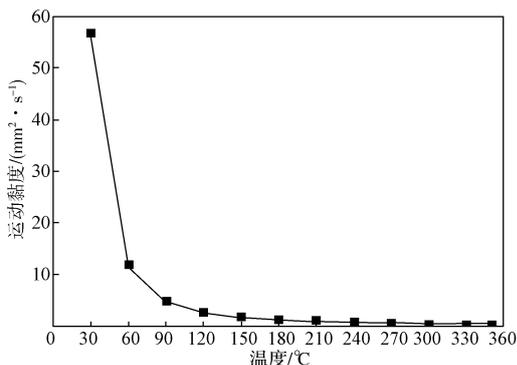
选择 T66 和 S750 作为测试的标准样品, 以验证 VM4100 型高温黏度计的测量误差在许可范围内。T66 导热油的使用温度范围为  $-7\sim 350$  °C, 实验测量温度范围为  $30\sim 350$  °C; S750 导热油的使用温度范围为  $0\sim 350$  °C, 实验测量温度范围为  $30\sim 350$  °C; 根据经验, T66 和 S750 导热油在测量温度范围内, 每隔 30 °C 取一个测量点。

通过测量标准样品 T66 和 S750 导热油黏度并确认黏度计测量误差在许可范围内后, 分别测量 T55、S700 及其混合液的黏度。T55 导热油的使用温度范围为  $0\sim 315$  °C, S700 导热油的使用温度范围为  $-20\sim 300$  °C, 实验测量温度范围均选为  $250\sim 350$  °C, 每隔 10 °C 取 1 个测量点。

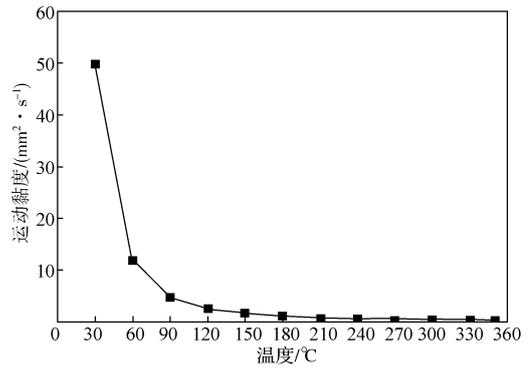
## 3 实验结果与分析

### 3.1 标准导热油样品

通过实验测量了 T66 和 S750 标准导热油样品在温度范围为  $30\sim 350$  °C 的黏度值, 并利用 Origin 软件绘制出 2 种导热油的黏度 - 温度变化曲线, 如图 3 所示。



a) T66



b) S750

图 3 黏度 - 温度曲线

Fig. 3 Viscosity-temperature curve

由图 3 可知, T66 和 S750 两种导热油的黏度均随着温度的升高而降低, 且在  $30\sim 120$  °C 区间内, 导热油黏度随着温度的升高快速降低; 但当温度超过 120 °C 以后, 黏度变化幅度均趋于平缓。

表 1 分别给出了标准样品导热油 T66 和 S750 的黏度实测值与实际值及其误差。

表 1 导热油黏度实测值与实际值对比

Table 1 Comparison of measured and actual values of T66 and S750

温度 / °C	T66			S750		
	实际值 / (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	实验值 / (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	误差 / %	实际值 / (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	实验值 / (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	误差 / %
30	56.896	54.425	4.34	49.889	48.180	3.43
60	11.740	11.183	4.74	11.827	11.667	1.35
90	4.692	4.688	0.08	4.811	4.858	0.98
120	2.592	2.416	6.79	2.576	2.651	2.91
150	1.655	1.603	3.14	1.652	1.621	1.88
180	1.171	1.200	2.48	1.144	1.208	5.59
210	0.892	0.858	3.81	0.857	0.843	1.63
240	0.715	0.767	7.27	0.702	0.654	6.84
270	0.594	0.563	5.23	0.589	0.562	4.58
300	0.509	0.542	6.48	0.514	0.483	6.03
330	0.450	0.481	6.89	0.450	0.433	3.78
350	0.419	0.405	3.41	0.424	0.391	7.78

依据表 1 可得, T66 和 S750 导热油的黏度测量平均误差分别为 4.55% 和 3.90%, 误差平均值均在 5% 以内, 处在工程许可的测量误差范围内, 这表明 VM4100 型高温黏度计可以用于测量常温至 350 °C 范围内的导热油黏度。

### 3.2 标准导热油样品数据拟合

结合文献 [6-8] 已知的黏度 - 温度关联式, 并以 T66 和 S750 两种导热油作为代表性导热油样品的实测黏度值数据为基础, 进行回归分析, 拟合得式 (2) 所示黏度 - 温度关联式:

$$\mu = 17\ 556T^{-1.835} \quad (2)$$

式中  $T$  为摄氏温度。

利用黏度-温度关联式(2),分别进行计算,可得到各温度下导热油 T66 和 S750 的黏度计算值。将导热油 T66 和 S750 在高温区间的黏度计算值与实验值进行对比,可得到相应的误差值,具体见表 2。

表 2 导热油 T66 和 S750 黏度实验值与计算值对比

Table 2 Comparison of experimental and calculated values of the heat transfer oil viscosity of T 66 and S750

温度 / ℃	T66			S750		
	实际值 / ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	计算值 / ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	误差 / %	实际值 / ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	计算值 / ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	误差 / %
30	54.425	49.191	9.80	48.180	49.191	2.10
60	11.183	9.583	14.30	11.667	9.583	17.90
90	4.688	4.554	2.90	4.858	4.554	6.30
120	2.416	2.686	11.20	2.651	2.686	1.30
150	1.603	1.784	11.30	1.621	1.784	10.00
180	1.200	1.276	6.40	1.208	1.276	5.70
210	0.858	0.962	12.10	0.843	0.962	14.10
240	0.767	0.753	1.80	0.654	0.753	15.10
270	0.563	0.607	7.70	0.562	0.607	7.90
300	0.542	0.500	7.80	0.483	0.500	3.50
330	0.481	0.420	12.70	0.433	0.420	3.10
350	0.405	0.377	7.00	0.391	0.377	3.60
	误差平均值		8.70	误差平均值		7.50

分析表 2 中的数据可知,以公式(2)计算得出的误差平均值较为接近,分别为 8.70%, 7.50%, 由此可知,公式(2)计算精度较高,可用来预测高温导热油黏度值。

### 3.3 混合导热油黏度

将 S700 和 T55、S700 和 S718 按不同质量比混合后,测量其在 250~350 ℃ 温度区间内的黏度值,表 3 和表 4 给出了不同混合质量比与温度下混合导热油的黏度值。由表 3 和 4 可以得知,当导热油以不同的质量比混合后,其黏度均随着温度的上升而降

低,直至出现最低值后再上升。导热油 S700 依次和 T55、S718 混合时,其混合导热油的最低黏度值分别出现在 335 ℃ 和 340 ℃ 左右,即在 T55、S718 的最高允许液膜温度附近。

表 3 S700 和 T55 的混合导热油黏度

Table 3 Viscosity of mixed heat transfer oil of S700 and T55

温度 / ℃	w(S700) : w(T55)				
	3:7	4:6	5:5	6:4	7:3
250	0.664	0.656	0.649	0.642	0.635
260	0.622	0.615	0.609	0.603	0.579
280	0.551	0.548	0.544	0.541	0.537
300	0.492	0.491	0.490	0.489	0.488
310	0.431	0.419	0.408	0.397	0.387
320	0.374	0.370	0.365	0.361	0.357
330	0.342	0.349	0.550	0.362	0.368
335	0.335	0.345	0.354	0.377	0.375
340	0.353	0.361	0.369	0.387	0.386
350	0.421	0.433	0.445	0.465	0.470

表 4 S700 和 S718 的混合导热油黏度

Table 4 Viscosity of mixed heat transfer oil of S700 and S718

温度 / ℃	w(S700) : w(S718)				
	3:7	4:6	5:5	6:4	7:3
250	0.687	0.676	0.665	0.655	0.614
260	0.643	0.634	0.624	0.615	0.579
280	0.588	0.579	0.570	0.561	0.527
300	0.531	0.524	0.517	0.511	0.485
310	0.478	0.458	0.439	0.422	0.357
320	0.462	0.443	0.425	0.408	0.345
330	0.415	0.411	0.407	0.403	0.389
340	0.381	0.385	0.389	0.394	0.412
350	0.458	0.465	0.473	0.480	0.511

表 5 给出了 S700 和 T55 的不同质量比混合导热油在 250~350 ℃ 温度区间内按照质量加权平均得到的黏度计算值和实测值。

表 5 混合导热油黏度计算值与实验值对比

Table 5 Comparison of calculated and experimental values of viscosity of mixed heat transfer oil

温度 / ℃	w(S700) : w(T55)=3:7			w(S700) : w(T55)=4:6			w(S700) : w(T55)=5:5			w(S700) : w(T55)=6:4			w(S700) : w(T55)=7:3		
	计算值 / ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	实测值 / ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	误差 / %	计算值 / ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	实测值 / ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	误差 / %	计算值 / ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	实测值 / ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	误差 / %	计算值 / ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	实测值 / ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	误差 / %	计算值 / ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	实测值 / ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	误差 / %
250	0.664	0.664	0.00	0.657	0.656	0.18	0.650	0.649	0.15	0.643	0.642	0.12	0.636	0.635	0.09
260	0.622	0.622	0.00	0.616	0.615	0.20	0.610	0.609	0.16	0.604	0.603	0.13	0.598	0.597	0.10
280	0.552	0.551	0.09	0.548	0.548	0.00	0.545	0.544	0.09	0.541	0.541	0.00	0.538	0.537	0.09
300	0.492	0.492	0.00	0.491	0.491	0.00	0.490	0.490	0.00	0.489	0.489	0.00	0.488	0.488	0.00
310	0.434	0.431	0.70	0.423	0.419	0.95	0.412	0.408	0.98	0.401	0.397	1.01	0.390	0.387	0.78
320	0.374	0.374	0.00	0.370	0.370	0.00	0.366	0.365	0.27	0.362	0.361	0.22	0.358	0.357	0.17
330	0.344	0.342	0.44	0.350	0.349	0.29	0.357	0.355	0.42	0.363	0.362	0.28	0.370	0.368	0.41
335	0.338	0.335	0.90	0.348	0.345	0.87	0.358	0.354	1.13	0.368	0.377	2.39	0.378	0.375	0.80
340	0.335	0.353	0.65	0.363	0.361	0.66	0.372	0.369	0.68	0.461	0.465	0.77	0.388	0.386	0.44
350	0.424	0.421	0.76	0.437	0.433	0.83	0.449	0.445	0.90	0.437	0.433	0.83	0.474	0.470	0.81
	误差平均值		0.38	误差平均值		0.83	误差平均值		0.48	误差平均值		0.68	误差平均值		0.37

由表5中所给出的数据可以看出,混合导热油的黏度计算值与实测值比较接近,最大误差为2.39%,由此得出混合导热油的黏度可按照质量成分加权计算得出。

## 4 结论

以VM4100高温黏度计和DM2000高温密度计为测试平台,测量了标准导热油样品、代表性导热油及其混合导热油在不同温度区间内的黏度值。

1) 通过测量标准导热油样品T66和S750的黏度值并与实际值进行比较,得知测量平均误差分别为4.55%和3.90%,均在5%以内,表明VM4100型高温黏度计可被用于导热油黏度的工程测量。

2) 对标准导热油T66和S750的实测黏度值进行回归分析,拟合所得黏度-温度关系式计算平均误差分别为8.70%和8.50%,均在9%以内,表明该关系式计算精度较高,可被用于预测高温导热油的黏度值。

3) 混合导热油黏度按质量成分加权进行计算所得结果表明,其计算值与实测值比较接近,最大误差为2.39%。由此可以得出,混合导热油的黏度可按照质量成分加权进行计算得出。

### 参考文献:

- [1] 赵钦新. 有机热载体炉技术及其进展 [J]. 工业锅炉, 2004(1): 24-30.  
ZHAO Qinxin. Technologies & Advances in Organic Heat Transfer Material Heater[J]. Industrial Boiler, 2004(1): 24-30.
- [2] 乔辉, 张军善. 蓖麻油粘度随温度变化关系的理论与研究 [J]. 大学物理实验, 2015, 28(1): 32-34.  
QIAO Hui, ZHANG Junshan. Theoretical Analysis of Viscosity of Cast Oil Charge with Temperature[J]. Physical Experiment of College, 2015, 28(1): 32-34.
- [3] 尚培娜. 温度对导热油黏度影响规律的研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2016.  
SHANG Peina. Study on the Effect of Temperature on the Viscosity of Heat Transfer Oil[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2016.
- [4] 王柳磊, 寇广孝. 两种导热油和水的黏度对比 [J]. 广州化学, 2017, 42(2): 26-31.  
WANG Liulei, KOU Guangxiao. Comparison of Viscosity of Two Kinds of Heat Transfer Oil and Water[J]. Guangzhou Chemistry, 2017, 42(2): 26-31.
- [5] 凡友康, 李进, 廖加栋. CO<sub>2</sub>-原油体系粘度及其预测模型的研究 [J]. 当代化工, 2018, 47(1): 197-200, 208.  
FAN Youkang, LI Jin, LIAO Jiadong. Study on CO<sub>2</sub>-Rude Oil System Viscosity and Its Prediction Models[J]. Contemporary Chemical Industry, 2018, 47(1): 197-200, 208.
- [6] VALERI D, MEIRELLES A J A. Viscosities of Fatty Acids, Triglycerides, and Their Binary Mixtures[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1997, 74(10): 1221-1226.
- [7] SINGH A K, MUKHERJEE P S, MISHRA N M. Interrelationship Among Viscosity, Temperature and Age of Lubricant[J]. Industrial Lubrication & Tribology, 2006, 58(1): 50-55.
- [8] KULKARNI D P, DAS D K, CHUKWU G A. Temperature Dependent Rheological Property of Copper Oxide Nanoparticles Suspension[M]. [S. l.]: American Scientific Publishers, 2006: 1150-1154.

(责任编辑: 廖友媛)