

符涛,徐爱祥,寇广孝,等.4种导热油比热容随温度变化规律[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(2):119-124.  
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.018

FU T, XU A X, KOU G X, et al. The Variation of Specific Heat of Four Heat Transfer Oils Related with Temperature[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(2): 119-124. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.018

## 4种导热油比热容随温度变化规律

符涛,徐爱祥\*,寇广孝,尹湘,朱杰,夏烨

(湖南工业大学 土木工程学院,湖南 株洲 412000)

**摘要:**随着经济的发展,有机热载体炉的使用越来越广泛,对导热油在不同温度下的比热容数据的需求也日趋强烈.采用HC2100流体比热测量仪测量了SKX310, LQ320, Lontherm-80, Lontherm-50这4种导热油在温度为30~290℃时的比热值.分析了导热油比热容随温度变化的规律,利用最小二乘法建立了导热油比热容随温度变化的函数关系式.研究结果表明:导热油比热容随温度的升高而增加,其中SKX310的增幅最大,达到了56.89%;比热容在高温区间随温度增加的幅度大于低温区间随温度增加的幅度.

**关键词:**导热油;比热容;高温;最小二乘法

**中图分类号:**TK175 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)02-0119-06

## The Variation of Specific Heat of Four Heat Transfer Oils Related with Temperature

FU Tao, XU Aixiang, KOU Guangxiao, Yin Xiang, ZHU Jie, XIA Ye

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412000, China)

**Abstract:** With the development of economy, the use of organic heat carrier furnaces becomes more and more widespread, and the demand for specific data of heat transfer oils at different temperatures becomes increasingly strong. The specific heat of SKX310, LQ320, Lontherm-80 and Lontherm-50 heat transfer oils between 30~290℃ were measured by HC2100 fluid specific heat capacity. The variation of specific heat capacity of heat transfer oil with temperature was analyzed, and the function of specific heat capacity of heat transfer oil with temperature was established by utilizing the least square method. The results show that the specific heat capacity of heat conducting oil increases with the increase of temperature, and SKX310 has the most increases, reaching 56.89%. The increases of specific heat capacity with temperature in the high temperature range is more than in the low temperature range.

**Keywords:** heat transfer oil; specific heat; high temperature; least square method

比热容是物质的一个重要物性参数,表示物质吸热或散热的能力.比热容不仅是热物性研究中检验状态方程等关系式的重要参数,也是科学研究和工程设计中的重要基础参数.根据准确的比热容数据,其他

收稿日期:2019-11-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51246007);湖南省研究生科研创新项目资助(CX20201044);湖南省大学生创新训练项目资助(S201911535048)

\*通信作者, E-mail: axxu@hut.edu.cn

的相关物性参数如发热量、传热特性等都可以通过一定的计算方法获得<sup>[1-3]</sup>。近年来,随着我国经济的发展,有机热载体炉的使用越来越广泛,数量也越来越多<sup>[4]</sup>,在工程计算中对于导热油在不同温度下的比热容数据的需求也日趋强烈。

赵小明等<sup>[5]</sup>通过准稳态量热计测量了纯水和正庚烷 2 种参考物质的比热容;何茂刚等<sup>[6]</sup>基于准稳态理论,通过变容积量热器法测量了含油 R134a 在温度为 273.15~293.15 K 时的比定压热容和比定容热容;闫格尼等<sup>[7]</sup>研究了 Co 粒子的质量分数、粒径、温度对纳米流体比热容的影响;Yin 等<sup>[8]</sup>研究了 TiO<sub>2</sub> 纳米材料对导热油热物性的影响;Shahrul 等<sup>[9]</sup>研究了不同制备方法和测量方法对纳米流体比热容的影响,以及纳米流体和基础流体的体积分数、温度、类型和尺寸对比热容的影响。

关于导热油热物性的研究主要集中于导热系数以及黏度特性等方面,而对于导热油的比热容研究相对匮乏。在有机热载体炉的实际运行中,由于介质温度、炉内压力等的限制,比热容的测量难度较大<sup>[10-11]</sup>。现有导热油比热测量系统只能测量低温区间的相关数据,无法测量高温区间导热油比热容的相关数据,且现有系统的自动化程度低、温度波动大,无法长时间维持温度的稳定,这些都严重影响了高温下导热油比热容精确数值的测量。

本文采用一种新型的高温导热油比热测量仪——HC2100 流体比热测量仪,该仪器基于流动型量热法,通过对流动型量热器进行改进以及内外绝热屏和电加热系统进行设计,最高测量温度可以达到 350 °C<sup>[12]</sup>。实验测量了 4 种导热油在 30~290 °C 时的比热容,得到比热容-温度曲线,分析了比热容随温度变化的规律,并利用最小二乘法建立了比热容-温度方程。

## 1 实验仪器、实验原理及测试方法

### 1.1 实验仪器

HC2100 流体比热测量仪主要用于测试高温导热油的比热容,可实现样品温度、加热电压的自动控制及测量、样品比热容的自动计算和保存,具有操作简单、测量精度高、适用范围广等优点。HC2100 流体比热测量仪主要包括 HC2100 比热计、笔记本、真空系统、平流泵、梅特勒天平等,其中,HC2100 比热计、真空系统、平流泵、梅特勒天平的实物图分别如图 1~图 4 所示。



图 1 HC2100 比热计

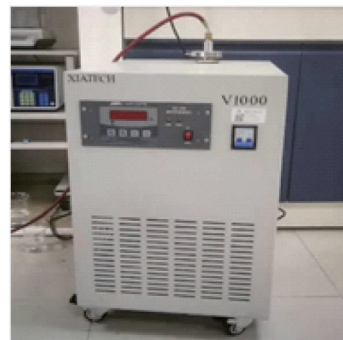


图 2 真空系统



图 3 平流泵



图 4 梅特勒天平

## 1.2 测量原理

HC2100 流体比热测量仪采用流动型量热法,流动型量热法主要对液体和气体进行测量<sup>[13]</sup>,且已成功应用于高压和高温情况下的测量,其主要测量方法:对稳定流经量热器的流体进出口温度进行测量,当流体流经加热器时会吸收一定的热量,量热器进出口流体之间会产生一定的温升,根据比热容的计算原理,即可求出比热容.

测量原理的计算公式<sup>[14-16]</sup>为

$$C_p = \frac{1}{q_m} \frac{P - \varphi_L}{\Delta T} \quad (1)$$

式中:  $C_p$  为被测流体的比热容;  $q_m$  为流体的质量流量;  $P$  为系统在恒定温差下的加热功率;  $\varphi_L$  为系统在恒定温差下的热流量损失;  $\Delta T$  为流体的温度变化.

## 1.3 实验方法

将被测样品加入样品容器,启动平流泵,样品被平流泵以均匀的流速泵入量热器上的铜柱进行预热,待其达到预设温度点并且温度波动稳定在 $\pm 1$  K时,流向下铜柱对样品温度进行更为精确地控制,使样品在预设温度点的温度波动控制在 $\pm 5$  mK.当样品温度维持稳态后,测温装置测量样品流入量热器进口的进口温度,并测量对经加热器加热后,流出量热器样品的温度作为出口温度.在整个实验系统中,通过背压阀和压力表来调节整个系统的压力.本次实验中系统压力为 1.5 MPa.

## 1.4 系统精度检验

为了检验该实验系统的测量精度,采用 HC2100 流体比热测量仪测量了常压下、温度变化范围为 20~90 °C 时纯水的比热容,共 8 个测量点,每个测量点在相同温度下重复测量 5 次,然后取平均值作为实验结果,测量结果见表 1.

表 1 纯水比热容的测量结果与文献[17]数据对比

$T/^\circ\text{C}$	$C_p/(J/(g \cdot K))$	$C'_p/(J/(g \cdot K))$	$(C_p - C'_p)/(J/(g \cdot K))$	$\left  \frac{C_p - C'_p}{C'_p} \right /\%$
20	4.35	4.183	0.167	4.0
30	4.30	4.174	0.126	3.0
40	4.27	4.174	0.096	2.3
50	4.25	4.174	0.076	1.8
60	4.23	4.179	0.051	1.2
70	4.25	4.187	0.063	1.5
80	4.29	4.195	0.095	2.3
90	4.31	4.208	0.102	2.5

注:  $C_p$  为实验测量数据;  $C'_p$  为文献[17]数据

由表 1 可知:与文献[17]数据相比,实验数据最大偏差为 0.167 J/(g·K),相对偏差平均值为 2.325%.

## 2 实验材料

实验随机选取了使用温度范围广、热稳定性好、性价比高的 4 种导热油作为实验对象,分别为 Lontherm-80, Lontherm-50, LQ320 和 SKX310,具体性能参数见表 2.

表 2 导热油性能参数

导热油	40 °C 时的运动粘度/(mm <sup>2</sup> /s)	热稳定性/%	最高允许使用温度/°C	外观
Lontherm-50	10.33	<7.3	320	淡黄色清澈透明液体
Lontherm-80	20.56	<7.5	300	淡黄色清澈透明液体
SKX310	27.37	<10	310	清澈透明液体
LQ320	40.00	<7.1	320	淡黄色透明液体
检验标准	GB/T265—1988	GB/T23800—2009	GB/T23971—2009	目测

### 3 实验数据

#### 3.1 数据处理

实验利用 HC2100 流体比热测量仪,在系统压力为 1.5 MPa 的情况下,分别测量了 Lontherm-50, Lontherm-80, SKX310 和 LQ320 这 4 种导热油在温度变化范围为 30~290 °C 时的比热容,共 14 个测量点.每个测量点在维持相同温度下对其重复测量 5 次,取 5 次实验结果的平均值作为实验数据.最终得到了各导热油比热容随温度变化的比热容-温度关系曲线,如图 5 所示.

由图 5 可知:在测量范围内,随着温度的升高,4 种导热油的比热容均随温度的升高而升高,其中 SKX310 的增幅最大,达到了 56.89%, Lontherm-80 的增幅最小,为 38.91%,其中,由国内同一厂家生产的 Lontherm-50, Lontherm-80 的比热容随温度增加的趋势基本相同,与其他厂家生产的导热油的差异较大.由图 5 可知:4 种导热油比热容在不同温度下的增加速率不同,高温区间的增加速率比低温区间大.在 230~290 °C 温度范围内,导热油比热容的增加量占总增加量的比率均高于 30%,其中 SKX310 占比为 32.19%, LQ320 占比为 30.28%, Lontherm-50 占比为 58.81%, Lontherm-80 占比为 51.72%.

#### 3.2 曲线拟合

利用数理统计方法将 4 种导热油的比热容数据进行回归分析,得到比热容和温度之间的函数表达式,在指数、对数、多项式等回归分析类型中,得到最适合实验数据的回归分析方程,具体回归分析结果见表 3.

表 3 回归分析结果

导热油	回归方程	公式编号	相关系数 $r$
SKX310	$y = 8 \times 10^{-6} T^2 + 0.001 8 T + 2.026 8$	(2)	0.993 9
LQ320	$y = 1 \times 10^{-5} T^2 + 0.001 3 T + 2.110 3$	(3)	0.998 1
Lontherm-50	$y = 1 \times 10^{-5} T^2 - 0.001 7 T + 1.785 6$	(4)	0.973 8
Lontherm-80	$y = 1 \times 10^{-5} T^2 - 0.001 1 T + 1.623 6$	(5)	0.987 6

由表 3 可知:导热油比热容与温度的回归方程均符合二次多项式关系.通过回归方程得到比热计算值,将计算值和实验值绘制成曲线图,如图 6~图 9 所示.

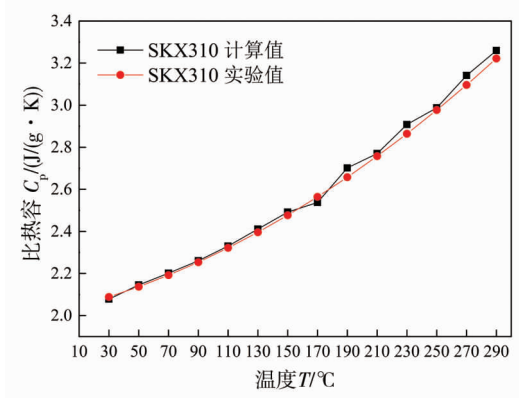


图 6 SKX310 比热容实验值与计算值对比

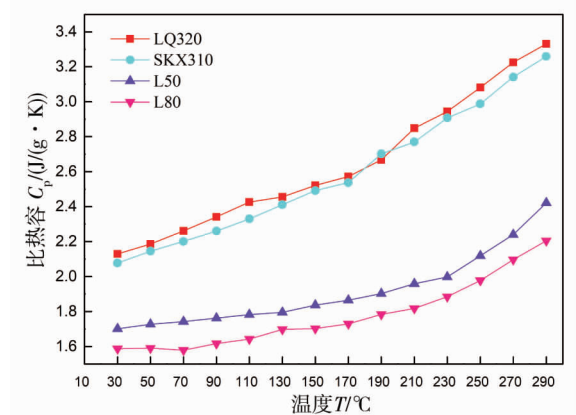


图 5 30~290 °C 各导热油比热容-温度关系曲线

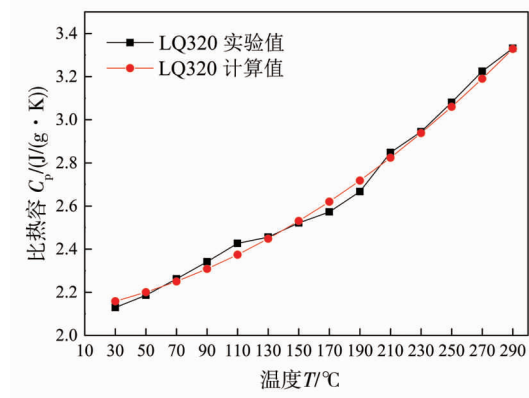


图 7 LQ320 比热容实验值与计算值对比

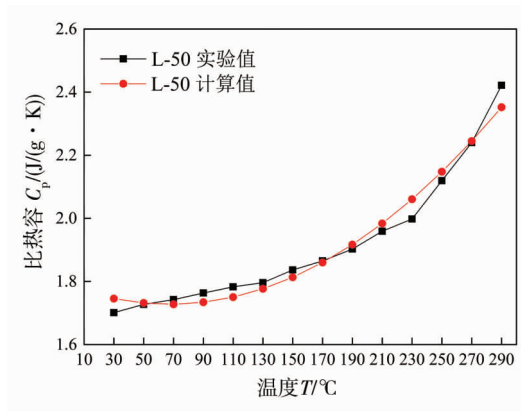


图 8 Lontherm-50 比热容实验值与计算值对比

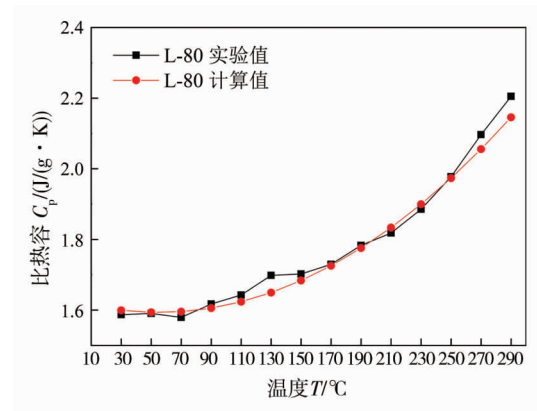


图 9 Lontherm-80 比热容实验值与计算值对比

由图 6~图 9 可知:4 种导热油比热容的实验值与计算值的变化趋势基本相同,结合表 3 中的相关系数可知,4 种导热油的回归方程与实验数据呈显著的线性相关关系.其中,LQ320 的回归方程的计算值与实验数据基本贴合,SKX310 和 LQ320 的误差均控制在 2%以内,平均误差分别为 0.08%和 0.55%;Lontherm-50 的误差范围为 0.1%~4.1%,平均误差为 1.95%;Lontherm-80 的误差控制在 3%以内,平均误差为 0.55%.

### 3.3 比热容-温度方程的显著性检验

在某些情况下,自变量  $x$  与因变量  $y$  之间不存在线性相关关系,但是仍可以利用最小二乘法求得  $x$  与  $y$  之间的线性拟合方程,这样求得的方程显然没有意义<sup>[18]</sup>.因此,需要对比热容-温度方程的可信度进行检验,可以通过可信性或拟合效果对其进行检验或衡量.本文以式(2)计算导热油 SKX310 比热容的相关系数为例,选择计算相对简单的  $F$  检验,对比热容-温度方程进行方差分析,见表 4,其中相关系数  $r = 0.9939$ ,显著性水平  $\alpha = 0.05$ .

查文献[18]的  $F$  分布表可知: $F_{0.05}(2, 10) = 4.10 < F$ ,说明通过拟合得到的比热容-温度关系式可信.同理,通过上述计算方法对其他的比热容-温度关系式进行  $F$  检验,均满足要求,计算式可信.

表 4 方差分析

差异源	SS	df	MS	$F$	显著性
回归	1.604 7	$m=2$	0.802 4	2 435.8	* *
残差	0.000 4	$n-m-1=10$	0.000 3		
总和	1.608 0	$n-1=12$			

注:SS 为平方和;df 为自由度;MS 为均方; $m$  为水平; $n$  为实验次数

## 4 结论

1) 导热油比热容随温度的升高而增加,且其比热容的增加过程符合一元二次函数关系,随着温度的升高,比热容对于温度的敏感性增强,在高温段的比热容增加幅度大于低温段.不同导热油比热容随温度的增幅也存在差异,其中,导热油 SKX310 的比热容增幅最大,Lontherm-80 最小.

2) 利用数理统计方法进行数据拟合得出了 4 种导热油比热容随温度变化的关系式,4 种导热油比热容与温度的相关系数  $r$  均大于 0.95,说明温度与比热容之间有较高的相关性.对比热容-温度关系式进行显著性检验,其  $F$  值均大于查表所得的值,说明通过实验数据建立的关系式可信而且显著度高.

### 参考文献:

[1] Zhong Q, Dong X Q, Zhao Y X, et al. Adiabatic calorimeter for isochoric specific heat capacity measurements and

- experimental data of compressed liquid R1234yf[J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2018, 125:86-92.
- [2] 江志铭,贺春辉,喻孟全,等.高温液体比热容测定仪在有机热载体锅炉能效测试中的应用[J].*工业锅炉*,2017(2):34-36.
- [3] Xia Z C, Wang W L, Luo S B, et al. Specific heat capacity and dendritic growth kinetics of liquid peritectic Fe-Cu alloys[J]. *Chemical Physics Letters*,2016,658:220-223.
- [4] 文志如.有机热载体锅炉在洗涤行业应用[J].*山东工业技术*,2018(5):48.
- [5] 赵小明,陆世豪,顾兆林,等.准稳态理论测量融解热及比热容的实验研究[J].*西安交通大学学报*,2005(9):958-961.
- [6] 何茂刚,钟秋,薛榕,等.变容积量热器法测量液体比热容实验研究[J].*热科学与技术*,2008(1):70-74.
- [7] 闫格尼,何钦波.太阳能集热 Co-H<sub>2</sub>O 纳米流体比热容特性实验研究[J].*真空科学与技术学报*,2017,37(11):1108-1112.
- [8] Yin X, Kou G X, Xu A X, et al. Effects of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on thermal on thermal conductivity of heat transfer oil[J]. *Journal of Central South University*,2019,26(8):2129-2135.
- [9] Shahrul I M, Mahbulul I M, Khaleduzzaman S S, et al. A comparative review on the specific heat of nanofluids for energy perspective[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014(38):88-98.
- [10] Murshed S M S. Simultaneous Measurement of Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity, and Specific Heat of Nanofluids[J]. *Heat Transfer Engineering*,2012,33(7/9):722-731.
- [11] 贺宇锋.超临界条件下乳化煤油比定压热容测量实验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2018.
- [12] 郑煜鑫,魏朝辉,李洁.液体比热容实验系统的研制[J].*计量学报*,2018,39(5):645-650.
- [13] 郑煜鑫,魏朝晖,李洁.采用流动型绝热量热法测量航空煤油的比热容[J].*山西建筑*,2018,44(3):217-219.
- [14] 赵小明,刘志刚,陈钟硕.流动型高压液体及其混合物定压比热容测量装置的建立[J].*上海交通大学学报*,1999(8):94-98.
- [15] 赵小明,刘志刚,陈钟硕.流动型量热法测量液体比热容实验研究[J].*西安交通大学学报*,1999(3):55-58.
- [16] Schröder E, Thomauske K, Schmalzbauer J, et al. Design and test of a new flow calorimeter for online detection of geothermal water heat capacity[J]. *Geothermics*,2015,53:202-212.
- [17] 章熙民,任泽霏,梅飞鸣.传热学[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [18] 李云雁,胡传荣.实验设计与数据处理[M].北京:化学工业出版社,2008.