

谐波法航空煤油热物性测量研究

郑兴华¹, 张璟¹, 唐大伟¹, 范学军²

(1 中国科学院工程热物理研究所传热传质中心, 北京 100190)

(2 中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室, 北京 100190)

摘要 本研究提出了应用基于谐波探测技术的 3ω 法进行高温高压液体导热性能导热性能测量的方法。设计了 3ω 测试系统, 使用蒸馏水和乙二醇验证实验方法和测试系统的合理性。应用此方法测试得到 0.1~5MPa, 300~500K 航空煤油的热导率和热扩散系数均随温度升高而降低, 随压力增大略有增大。

关键词 航空煤油, 高温高压, 导热, 热扩散率

引言

作为材料的基本物性, 热物性参数的准确测量和描述对于航空煤油的应用具有重要作用。航空煤油由上千种成份组成, 包括 C7-C16 等多种链烃、环烷以及芳香族化合物, 其具体成份随产地、厂家和年份等而有所变化, 热物理性质的研究有相当难度。因而大多数研究为了简化问题, 采用替代燃料的概念, 即采用由少数典型高纯度碳氢化合物组成的混合物去模拟真实碳氢燃料的热物理特性。但是替代模型的选择及对应法则会影响数值模拟得到的物性数据的准确性。研究航空煤油热物性的测量方法, 一方面可提供基础数据, 另一方面也可以衡量替代燃料方法的精度。

目前对于液体热物性的测量方法主要有稳态法、热线法、瞬态热源法。稳态法是传统材料热物性测量手段^[1], 其理论依据为稳态导热微分方程, 能直接测得液体的热导率。这种方法的实验公式简单, 但实验时间较长, 需要测量导热量和试样上若干点的温度。热线法是将通入直流电流的金属细丝作为热源加热样品^[2-4], 通过测量热线的温升计算样品的导热及热扩散。由于采用直流电加热, 热线自身的热容以及热线和液体之间的温差可能引起液体的对流作用, 使实际的测试系统偏离理论模型。瞬态热源法是由斯洛伐克科学院物理研究所的 Ludovit Kubicar^[5,6] 提出并加以规范化的, 但

由于受到封装材料——聚酰亚胺的耐温限制, 仅适合 150℃以下材料热物性测量。

基于谐波探测的 3ω 测量技术^[7,8] 虽然已经提出了几十年, 但目前利用该方法测量液体热物性的研究很少^[9,10]。这种方法的特点是可实现液体材料内部的热量传递。微型加热丝通过微弱交流信号加热样品, 由加热丝的三次谐波得到样品温度波动信号, 利用交流锁相放大技术, 采用很小的时间常数就可以快速探测到稳定的三次谐波, 包含与液体热参数有关的丰富信息。在频域内, 通过增大加热频率可以减小热作用深度, 进而减弱液体震荡及对流产生的干扰。

1 试验方法

1.1 实验原理

在 3ω 法实验中^[10-16], 对金属丝加角频率为 ω 的交流电流, 由于金属丝有一定的电阻, 因焦耳效应产生的热量以 2ω 的频率对金属丝和样品加热, 产生频率为 2ω 的温度波与频率为 ω 的交流电共同作用产生频率为 3ω 的电压。由于交流信号的微弱加热作用和样品的导热作用, 直径为 17 μm 左右的加热丝径向温差很小, 可用加热丝表面的温度波动幅值 $\theta(\omega, r)$ 表示加热丝整体沿径向的平均温度波动。忽略加热丝自身热容的影响, 根据 Bessel 函数的性质有

$$\theta(\omega, r) = \frac{P}{4\pi\lambda l} \left[\ln \frac{a}{r^2} - \ln \omega + \ln 2 - 2\gamma - i\pi \right] \quad (1)$$

根据三次谐波电压的实部分量可以得到加热丝平均温度波动幅值的实部分量^[14,15]

$$\theta(\omega, r) = \frac{2}{\alpha} \frac{U_{3\omega}}{U_{1\omega}} \quad (2)$$

进而可以根据(1)和(2)得到三次谐波与测试系统各个参数之间的关系:

$$U_{3\omega} = \frac{I_{1\omega}^3 R_0^2 \alpha}{8\pi\lambda l} \sqrt{0.25\ln^2\left(\frac{\omega r^2}{4a}\right) + \gamma \ln\left(\frac{\omega r^2}{4a}\right) + 0.95} \quad (3)$$

综上所述,根据式(1)可知,浸没在液体中的加热丝的温度波动主要与加热频率、液体的导热系数、热扩散率以及加热丝的直径和热参数等因素有关。如果测量出不同交流加热频率下的三次谐波,由式(2)可得到对应的温度波动信号。根据式(1)首先在低频下利用温度波动的实部分量与对数频率曲线的斜率直接确定液体的导热系数;然后考虑到高频下加热丝自身的影响,采用式(3)拟合出液体的热扩散率。根据以上测量原理和影响因素的分析,参考 3ω 法的不确定度计算方法^[16],该方法测量液体导热系数和热扩散率的不确定度分别小于3%和5%。

1.2 实验系统

建立如图1中所示的 3ω 测试系统,采用的主要仪器为Signal Recovery 7265锁相放大器、Agilent33220A信号发生器及恒温釜。同时将探测器作为加热器和温度传感器,信号发生器发出交流信号,经过功率放大施加于加热丝产生热波加热被测样品,产生的谐波经放大后由锁相放大器进行谐波分离,并探测其相应的电压幅值,然后根据热波频率与温度变化的关系经过数据采集及处理后得到被测样品的导热系数及热扩散率。

3 实验结果及分析

首先使用蒸馏水及乙二醇对该方法进行校准,对300K常压下蒸馏水和乙二醇的导热及热扩散系数进行测量,所得导热系数及热扩散系数分别为0.598W/(m·K)、 $1.505 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 和0.259 W/(m·K)、 $0.967 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 。与公布的参考数据吻合,说明该方法可实现液体热物性的精确测量。

采用该实验系统对300~500K、0.1~5MPa的3号航空煤油导热系数、热扩散系数进行了测量,图2为航空煤油导热系数随压力及温度变化示意图,图3为热扩散率随压力及温度变化示意图。

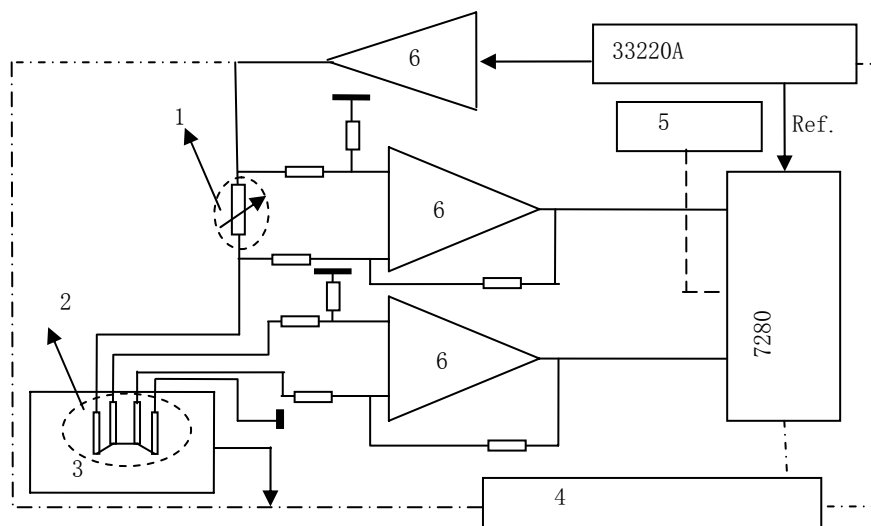


图1 3ω 法测试系统

1-平衡电阻 2-探测器 3-恒温恒压釜 4-数据处理器 5-频谱仪 6-运放

由图可见,导热系数和热扩散系数均随温度升高而减小,在所测量的压力范围内,导热及热扩散随压力的变化趋势都不明显,但基本上导热系数和热扩散系数随压力的增大而略有

上升。在380K以上同样温度下,常压下的导热及热扩散那明显低于其他压力下的测量值,这是由于在常压高温下煤油中的轻质组分挥发或分解,使得煤油组分发生明显变化。而在其

他压力作用下,轻质组分难以挥发或分解,成分恒定,因此同温度下,虽然基本上导热系数和热扩散系数随压力的增大而略有上升,但变化不大。

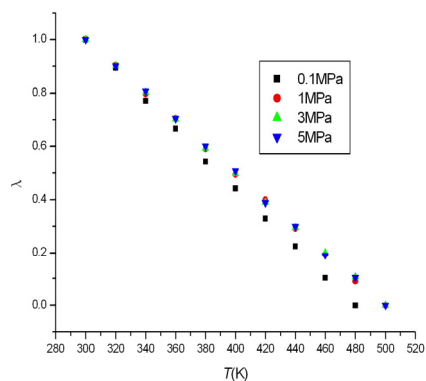


图2 导热随温度及压力变化曲线

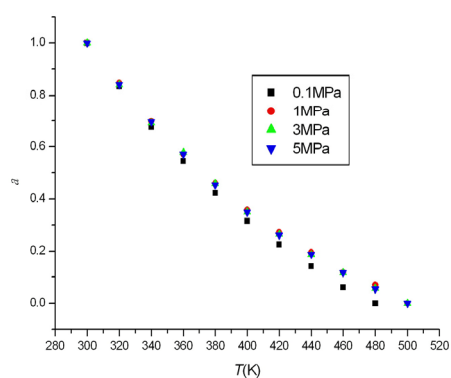


图3 热扩散率随温度及压力变化曲线

4 结 论

本文对 300~500K、0.1~5MP 区间的 3 航空煤油导热及热扩散率进行了系统的实验研究,为航空煤油的应用及其他研究或设计人员提供了参考依据。

在所测范围内,煤油的导热及热扩散均随温度升高而线性降低,随压力增大略有增大,但变化不明显。在 380K 以上同样温度下,随着温度的升高,常压下的煤油由于挥发或分解导致组分发生变化,常压下的导热及热扩散明显小于其他压力下的测量值。

参考文献

1. 盛建军,单春贤,樊红岗,朱志萍. 圆球法测量松散材料导热系数嵌入式测控系统的研究分析.[J] 西华大学学报·自然科学版.2006,26(11):45—47

2. 张延军,于子望,黄 芮,吴 刚,胡继华. 岩土热导率测量和温度影响研究.[J] 岩土工程学报.2009,31(2):213—217
3. 庄迎春,谢康和,孙友宏. 砂土混合材料导热性能的试验研究 [J]. 岩土力学,2005,26(2): 261—264
4. 范有明,宁 练,时章明,马安君. 热线法快速测量微粒导热系数的研究.[J] 工业计量. 2006,16(6):1—3
5. Kubicar L. Pulse method of measuring basic thermophysical parameters. Comprehensive Analytical Chemistry, Vol. XII, Thermal Analysis, Part E, (Ed. Svehla G, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier), 1990,350
6. Kubicar L, Bohac V. Review of several dynamic methods of measuring thermophysical parameters. Proc. of 24th Int. Conf on Thermal Conductivity / 12th Int. Thermal Expansion Symposium October 26—29 1997, (Eds Gaal PS and Apostolescu DE, Lancaster: Technomic Publishing Company), 1998, 135—149
7. Cahill D G, Pohl R O. Thermal conductivity of amorphous solids above the plateau. Physical Review B, 1987,35(8): 4067—4073
8. Cahill D G. Thermal conductivity measurement from 30 to 750K: the 3 ω method. Rev. Sci. Instrum, 1990, 61(2): 802—808.
9. Z.L. Wang, D.W. Tang, S. Liu, X.H. Zheng, and N. Araki, Thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of nanofluids by 3 ω method and mechanism analysis of heat transport, Int. J. Thermophys, 2007,28(4): 1255—1268
10. 王照亮,唐大伟,郑兴华,周乐平,刘石. 利用 3 ω 法同时测量纳米流体导热系数和热扩散率. 化工学报,2007,58(10):2493—2469
11. Z.L. Wang, D.W. Tang, and X.H. Zheng, Simultaneous determination of thermal conductivities of coating film and substrate by extending 3 ω -method to wide-frequency range, Appl. Surf. Sci., 2007, 253(22): 9024-9029
12. Z.L. Wang, D.W. Tang, X.H. Zheng, W.G. Zhang, and Y.T. Zhu, Length-dependent thermal conductivity of single-wall carbon nanotube: prediction and measurements, Nanotechnology, 2007,18(47) 475714. (DOI: 10.1088/0957-4484/18/47/475714)
13. Z.L. Wang, D.W. Tang, W.G. Zhang, X.H. Zheng, X.B. Li, L.X. Zheng, Y.T. Zhu, A.Z. Jin, H.F. Yang, and C.Z. Gu, Length-dependent thermal conductivity of an individual single-wall carbon nanotube, Appl. Phys. Lett.,2007,91(12), 123119. (DOI: 10.1063/1.2779850, which has been selected for the October 8, 2007 issue of Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology)
14. Cahill D G, Pohl R O. Thermal conductivity of amorphous solids above the plateau. Physical Review B, 1987, 35(8): 4067—4073
15. Cahill D G. Thermal conductivity measurement from 30 to 750 K: the 3 ω method. Rev. Sci. Instrum, 1990, 61(2): 802—808
16. Wang Zhaoliang, Tang Dawei. Analytical solution for temperature oscillation in the heater/thermometer film in 3 ω method and its application to thermal conductivity measurement of micro/nanometer-films. Acta Physica Sinica, 2007, 56(2):747—754

USING 3ω METHOD TO MEASURE THERMAL PROPERTIES OF JET FUEL

Zheng Xinghua¹ Zhang Jing¹ Tang Dawei¹ Fan Xuejun²

(1 Heat Transfer Center of Institute of Engineering Thermophysics, C A S, No.11 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

(2 Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

Abstract A 3ω method was developed for the simultaneous determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of high temperature and high pressure liquids. The 3ω experimental system was established. To evaluate the validity and accuracy of the developed experimental system we performed measurements in water and ethylene glycol with known properties. The thermal conductivity and thermal diffusivity of Jet fuel at 0.1~5MPa and 300~500K were measured using the established system. At room temperature, the thermal conductivity and thermal diffusivity of Jet fuel was proved to decrease with temperatures. At the same time, they increase little with the increased pressures.

Keywords Jet fuel, high temperature and high pressure, thermal conductivity, thermal diffusivity