

基于激光光热法的固体热扩散率数值分析

张青枝¹, 吴 钢¹, 庞之洋¹, 冯巧莲¹, 毕 柯¹, 李雁飞¹, 石 零²

(1. 海军工程大学机械工程系, 湖北 武汉 430033; 2. 江汉大学 化学与环境学院, 湖北 武汉 430056)

摘 要: 固体材料的热扩散率对于研究低温非稳态导热过程极为重要, 为了研究固体材料在低温下的热扩散率, 本文根据热扩散理论模型计算样品材料在不同温度时的热扩散率, 在此基础上基于激光光热法对热扩散率与激光频率和相位之间的函数关系进行了数值模拟, 数值计算结果与实验数据对比表明两者基本相符, 研究表明激光光热法可对固体材料的热扩散率进行有效测量, 样品材料在低温下热扩散率的数值模拟表明 20 ~ 80 K 温区样品材料热扩散率随温度变化而显著变化, 80 ~ 300 K 温区材料热扩散率变化较小。

关键词: 激光光热法; 热扩散率; 低温工程

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.02.003

Numerical analysis of solid thermal diffusivity based on laser photothermal method

ZHANG Qing-zhi¹, WU Gang¹, PANG Zhi-yang¹, FENG Qiao-lian¹
BI Ke¹, LI Yan-fei¹, SHI Ling²

(1. Department of Mechanical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. School of Chemistry and Environment Engineering, Jianghan University, Wuhan 430056, China)

Abstract: Solid thermal diffusivity is very important to study unsteady heat conduction under low temperature. In order to study solid thermal diffusivity under low temperature, sample thermal diffusivity under different temperature is computed in term of thermal diffusivity theory model in the paper. Besides, function relation between laser frequency and phase lag is gained by numerical simulation. The two groups of data are approximately equal by contrasting the numerical result and experimental result. The research indicates that solid thermal diffusivity could be measured availablely by laser photothermal. Numerical simulation of solid thermal diffusivity under low temperature shows that solid thermal diffusivity changes remarkably when the scope of temperature is from 20 K to 80 K, however, the change is less from 80 K to 300 K.

Key words: laser photothermal method; thermal diffusivity; cryogenic engineering

1 引 言

薄片状铜和铝是航天和超导等低温工程中常用的导热材料, 其热扩散率关系到材料导热过程中的均温性能, 该参数对非稳态导热过程的分析极为重要, 热扩散率定义式为:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C} \quad (1)$$

式中, k 为热导率; ρ 为密度; C 为比热容。其中, 密度随温度变化较少, 而热导率和比热容是强烈的温度函数, 采用稳态方法测量热扩散率需测量相应温

度下的热导率和比热容, 所需设备多, 耗时长, 且精确度不高。近 20 年来, 对片状固体材料热扩散率的研究有了很大进展, 提出了多种测量方法, 如激光光热位移技术^[1]、光热光偏转技术^[2]、激光闪光法^[3]、激光光声技术^[4]等。激光光热法测量方法具有非接触, 测量耗时短, 可以检出微小信号和精度高等特

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51076165) 资助。

作者简介: 张青枝 (1977 -), 女, 硕士, 讲师, 主要从事船舶辅助机械和专家系统研究。E-mail: zhqizh1024@163.com

收稿日期: 2011-06-22

点^[5]。在采用调制激光光热法测量材料热扩散率时,激光频率-相位与材料热扩散率的关系是测量中的关键技术,本文根据热扩散理论模型计算高纯铜样品在不同温度时的热扩散率,在此基础上基于激光光热法,对热扩散率与激光频率和相位之间的函数关系进行了数值模拟,并将数值计算结果与实验数据进行了对比和理论分析。

2 激光光热法测试原理

激光光热测量法是利用材料的光学反射率与温度的关系来获得材料的热物性参数的^[5-6],热扩散率激光光热测量法原理如图 1 所示^[7]。

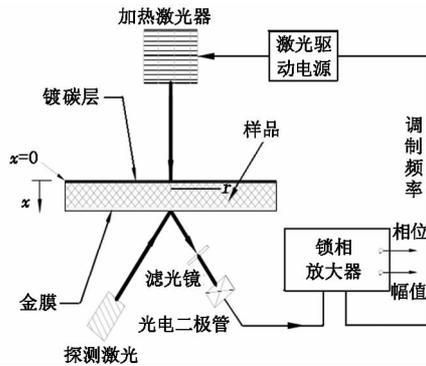


图 1 激光光热法测量固体材料热扩散率的原理图

Fig. 1 theory diagram of measuring solid thermal diffusivity by Laser photothermal

由加热激光器加热样品的一个表面(加热面),在样品内产生热波,热波通过样品到达另一面(探测面)时,探测面的温度将随调制频率而波动,利用探测激光器照射探测面,来获取材料温度的变化引起的光反射率的变化,再通过光电二极管检测探测激光反射光线的强度,向锁相放大器输入检测信号,并检测相位差和振幅信号。根据图 1,忽略辐射对流与样品的热传递,并假设研究固体材料的热扩散率是各向同性的,其一维热传导方程可写为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

其边界条件和初始条件为:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{Q}{\pi a^2} e^{-i\omega t} \quad \text{当 } r \leq a$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad \text{当 } r \leq a$$

$$T(x, 0) = T_0 \quad (3)$$

式中, Q 是入射激光被加热表面所吸收的强度; i 是虚数单位, $i^2 = -1$; ω 是加热激光的调制角频率, $\omega = 2\pi f$; a 为加热激光光斑的半径; T_0 为测量时样品的温度; x 是样品的深度。由方程解得在光斑中心处沿 x 方向厚度为 L 处温度为:

$$T = \frac{Q_{\text{exp}} \left[L \sqrt{\frac{\pi f}{\alpha}} \right]}{\pi a^2 \sqrt{\pi f k \rho C}} \exp \left[-i \left(\omega t - \left(L \sqrt{\frac{\pi f}{\alpha}} + \frac{\pi}{4} \right) \right) \right] \quad (4)$$

在高频限条件下(样品厚度 L 大于热扩散长度 $D = \alpha/\pi f$)时,材料热扩散率与调制频率间的关系可表示为:

$$\phi = d \sqrt{\pi f / \alpha} + \frac{\pi}{4} \quad (5)$$

对上式进行变换,得到:

$$\alpha = \pi f \left(\frac{L}{\phi - \frac{\pi}{4}} \right)^2 \quad (6)$$

式中, f 为加热激光的调制频率,Hz; L 为样品厚度,m; ϕ 是相位滞后,rad; α 热扩散率, m^2/s 。根据上式可知,要想确定测试样品的热扩散率 α ,需要知道样品的厚度、调制激光的频率和相位差。按照热波理论,公式中的常数 $\pi/4$ 是热流波和温度波间所存在的相位差。

3 高纯铜热扩散率的数值模拟

3.1 固体材料热扩散率与激光相位、调制频率的数值模拟

根据调制频率与材料的热扩散率间的关系,对高纯铜样品进行模拟仿真。选取铜样品的直径为 10 mm,厚度 0.652 mm,频率选在 200 ~ 2000 Hz 之间^[5],选取温度分别为 20 K,80 K 和 300 K。根据文献[8]查得,当温度为 20 K 时,高纯铜的热导率为 $4900 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,比热容为 $7 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,密度为 $8930 \text{ kg}/\text{m}^3$,根据热扩散率的定义式可求出其值为 $0.078 \text{ m}^2/\text{s}$ 。则热扩散长度最大值为 $D = \alpha/\pi f = 0.000124 < 0.000652$ (样品的厚度),因此材料热扩散率和调制频率之间的关系满足公式(5),基于 Matlab 编程解算可得高纯铜样品在 20 K 时调制频率和相位差的关系曲线如图 2 所示。

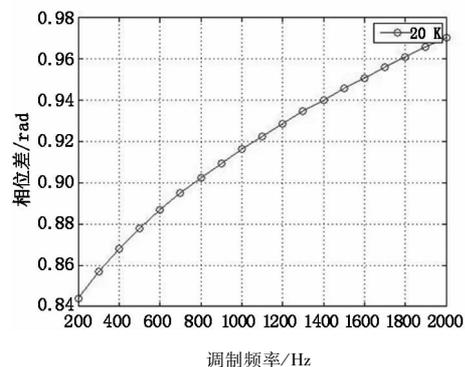


图 2 在 20 K 时调制频率和相位差的关系曲线

Fig. 2 relative curve between modulation frequency and phase lag at 20 K

而参考文献[5]中高纯铜的实验数据和拟合曲线如图 3 所示。

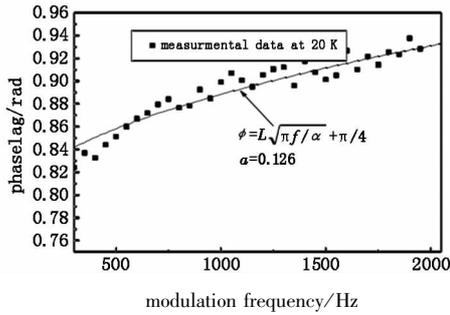


图3 在 20 K 时调制频率与相位差数据及拟合曲线
Fig.3 relative data and fitting curve between modulation frequency and phase lag at 20 K

比较图 2、图 3 可知,在频率范围相同时,图 2 中的相位差范围与图 3 中拟合曲线的相位差范围较接近,两条曲线相吻合。

同理,当温度为 80 K 时,查文献[8],计算其热扩散率为 $3.19 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$,得到铜样品在 80K 时调制频率和相位差的关系曲线如图 4 所示。

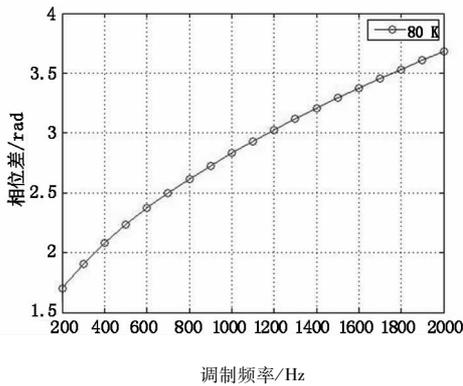


图4 在 80 K 时调制频率和相位差的关系曲线
Fig.4 relative curve between modulation frequency and phase lag at 80 K

参考文献[5]中高纯铜在 77 K 时的实验数据是 $3.21 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$,近似相同。这是在低温情况,再来分析常温时热扩散率是否与实验数据相吻合。当温度为 300 K 时,查文献[8],计算其热扩散率为 $1.15 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$,得到铜样品在 300 K 时调制频率和相位差的关系曲线,如图 5 所示。

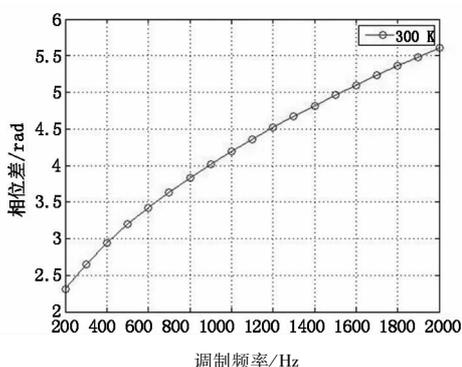
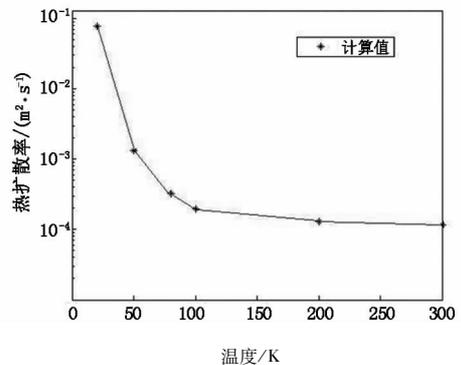


图5 在 300 K 时调制频率和相位差的关系曲线
Fig.5 relative curve between modulation frequency and phase lag at 300 K

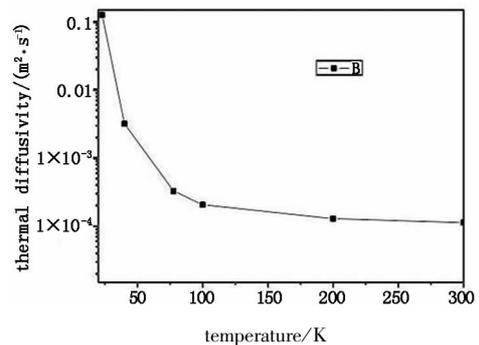
参考文献[5]中高纯铜在 300 K 时的实验数据是 $1.13 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$,与理论数据近似相等。

3.2 固体材料热扩散率的数值模拟和分析

通过以上理论计算,得出三种不同温度下的热扩散率,为了研究热扩散率与温度之间的关系,分别再选取了三个温度(50 K,100 K,200 K)进行计算,得出热扩散率与温度的关系图(如图 6(a)所示),与文献[5]中热扩散率与温度的实验关系图(如图 6(b)所示)相比,非常吻合,特别是 80 K 和 300 K 温度下几乎相同,在 20~80 K 温区高纯铜的热扩散率随着温度的升高而降低变化显著,其热扩散率的理论值由 $0.078 \text{ m}^2/\text{s}$ 降低到 3.19×10^{-4} ,在 20 K 时计算值与实验值误差较大,主要与材料的低温特性、实验数据采集和处理的精度有关,根据式(1)固体材料的热扩散率由材料的热导率、密度和比热容决定,由于固体材料的密度随温度的变化较小,而固体金属材料的热导率和比热容随温度变化而明显变化,这是因为固体金属的热导率由声子和电子的热导率共同决定,在低温下,声子的散射距离随温度而增加,但温度在 80 K 以上时散射距离变化较少,因此随着温度的升高,热扩散率变化较小。



(a) 热扩散率的计算数据
(a) computing data of thermal diffusivity



(b) 热扩散率的实验数据
(b) experimental data of thermal diffusivity

图6 热扩散率与温度的关系图

Fig.6 relative diagram of thermal diffusivity and temperature

通过对高纯铜样品分析可知,在不同温度的情况下,相位差是不同的,且温度越高,相位差越大,热扩散率越小,表明在 80 ~ 300 K 温区,由于声子散射距离减小,热扩散速度减慢,加热激光与探测激光之间的相位差加大。

4 结束语

热扩散率数值模拟结果与利用激光光热法测量得到的实验数据对比表明该方法可用于固体材料低温热扩散率的测量,在不同温区样品测量热扩散率、频率与相位差之间的关系曲线反映了在声子散射对热扩散率的影响,在 80 K 以下低温区,声子散射距离对固体材料的热扩散和均温性能影响较 80 K 以上温区强烈;将激光光热方法引入低温工程领域,运用新的方法和理论研究低温固体材料热扩散率将会更加高效。

参考文献:

- [1] Yang Shulian. Measurement of diffusivity of nanometer material by means of laser photothermal displacement technique[J]. Laser Technology, 2007, 2(31): 29 - 30. (in Chinese)
杨淑连. 基于激光光热位移技术纳米材料热扩散率的测量[J]. 激光技术, 2007, 2(31): 29 - 30.
- [2] Zeng Shengcai, Fang Jianwen, Wang Zhihai. Study on the new method of measuring thermal diffusivity for solid materials by photothermal deflection technique [J]. Journal of Zhejiang Normal University, 2009, 6(32): 169 - 173. (in Chinese)
曾胜财, 方健文, 王志海. 利用光热光偏转技术测量固体热扩散率的新方法[J]. 浙江师范大学学报, 2009, 6(32): 169 - 173.
- [3] D W Tang, N Arak. Measuring thermal diffusivity of thin film by laser flash method[J]. Journal of Jinzhou Normal College: Natural Science Edition, 2002, 3(23): 1 - 7. (in Chinese)
唐大伟, 荒木信幸. 应用激光闪光法测量薄膜材料的热扩散率[J]. 锦州师范学院学报: 自然科学版, 2002, 3(23): 1 - 7.
- [4] Wang Peiji, Zhou Zhongxiang, Liang wei, et al. The measuring thermal diffusivity of film materials by laser photoacoustic backing exciting technique [J]. Laser Journal, 2006, 2(30): 24 - 25. (in Chinese)
王培吉, 周忠祥, 梁伟, 等. 利用激光光声技术测量薄膜材料的热扩散率[J]. 激光杂志, 2006, 2(30): 24 - 25.
- [5] Shi Ling. Investigation of heat transport on the solid-solid contact Interface at low temperature [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2006, 11. (in Chinese)
石零. 低温固-固接触界面热传输研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006, 11.
- [6] A Salazar, A SÚchea Lavega, J M Terrón. Effective thermal diffusivity materials measured by modulated photothermal technique[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(6): 3031 - 3040.
- [7] Peng Xiaofang. Investigation on thermal contact resistance by optical measurement for space application [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2007, 1. (in Chinese)
彭小方. 空间应用低温固体材料的界面热阻研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007, 1.
- [8] И Г Козевников, Л А Новидки. Material thermal physics property manual [J]. Beijing: Space Navigation Press, 1987. (in Chinese)
И Г 柯日伏尼克夫, Л А 诺维茨基. 材料低温热物理性能手册[J]. 北京: 宇航出版社, 1987.