



# 温度设定对金属线胀系数影响的研究<sup>\*</sup>

王 博 刘云虎 杨 坤 王雪燕 范 婷  
(石河子大学理学院生态物理重点实验室 新疆 石河子 832003)

路彦冬

(石河子大学教务处 新疆 石河子 832003)

(收稿日期:2022-11-10)

**摘 要:**实验分别采取持续升温(大间隔 5 °C)、持续升温(小间隔 2 °C)、设定升温(大间隔 5 °C)和设定升温(小间隔 2 °C)4 种方法测定金属 Al 的线胀系数.从实验结果可知,持续升温法比设定升温法测定的金属 Al 线胀系数误差大,因为本实验加热系统具有热惯性和 PID 温控仪传感器滞后性,导致瞬时温度并不是实际温度.小间隔设定升温法获得的线胀系数比大间隔设定升温法测出的线胀系数要更精确,小间隔设定升温法的相对误差仅为 0.25%,用最小二乘法拟合曲线与实验数据的拟合相似度为 0.999 8,拟合度非常高、耗时较短.故小间隔设定升温法适合本实验教学.

**关键词:**线胀系数;千分表;温度设定法;PID 温控仪

线膨胀系数是很多工程技术中选材料的重要技术指标,在道路、桥梁、建筑等工程设计、精密仪器仪表设计、材料的焊接和加工等领域中都是非常重要的参数之一.通过对材料线膨胀系数随温度变化曲线的测定,可以进行材料矿物分析、相变、微裂纹的愈合和扩展等的研究.线膨胀系数测量方法有光杠杆法<sup>[1]</sup>、千分表法<sup>[2]</sup>、读数显微镜法<sup>[3]</sup>、光学干涉法<sup>[4]</sup>、衍射法<sup>[5]</sup>和组合法<sup>[6]</sup>等.

本实验采用千分表法 FB712A 型线膨胀系数测定仪测金属线膨胀系数,分别采取持续升温大间隔 5 °C、持续升温小间隔 2 °C、设定升温大间隔 5 °C 和设定升温小间隔 2 °C 4 种方法测定金属 Al 的线胀系数.从实验结果可知,持续升温法比设定升温法测定的金属 Al 线胀系数误差大,但小间隔比大间隔持续升温法获得的值更稳定,因为本实验加热系统具有热惯性和 PID 温控仪传感器滞后性,瞬时温度并不是其实际温度.小范围设定温度法获得的线胀系数比大范围设定温度法测出的线胀系数要更精

确,利用 Origin 软件分析设定升温法(小间隔 2 °C)的实验值,与理论值相比相对误差仅为 0.25%,用最小二乘法拟合曲线与实验数据的拟合相似度为 0.999 8,拟合度非常高.故设定升温(小间隔 2 °C)法最适合本实验教学.并从 51.0 ~ 59.0 °C 下的金属 Al 线胀系数可以看出,该实验传感器在 55 °C 附近的线胀系数最接近理论值,故可判定 PID 温控仪整定温度为 55 °C.

## 1 固体线膨胀系数的原理

固体在各方向上热膨胀规律相同时,可以用固体在一个方向上的线膨胀规律来表征体膨胀.固体物质的温度每升高 1 °C 时,其单位长度的伸长量叫做线膨胀系数,有时也称为线弹性系数.

固体受热后的长度  $L$  和温度  $t$  之间的关系为

$$L = L_0(1 + \alpha t) \quad (1)$$

式中  $\alpha$  就是固体的线膨胀系数,其物理意义为温度每升高一度时物体的伸长量与它在零度时的长度

<sup>\*</sup> 2022 年高等学校教学研究项目,项目编号:DWJZW202217xb;2022 年石河子大学教改项目,项目编号:JGY-2022-109.

作者简介:王博(1982-),女,高级实验师,主要从事物理实验和等离子体降解研究工作.

比,单位是  $1/^\circ\text{C}^{[7-10]}$ .

如果在温度  $t_1$  和  $t_2$  时,金属杆的长度分别为  $L_1$  和  $L_2$ ,则有

$$L_1 = L_0(1 + \alpha t_1) \quad (2)$$

$$L_2 = L_0(1 + \alpha t_2) \quad (3)$$

联立式(2)、(3)可得

$$\alpha = \frac{L_2 - L_1}{L_1 \left( t_2 - \frac{L_2}{L_1} t_1 \right)}$$

由于  $L_1$  与  $L_2$  相差微小,  $\frac{L_2}{L_1} \approx 1$  所以上式可近似写为

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_1 \Delta t}$$

式中  $\Delta L = L_2 - L_1$  是固体当温度变化  $\Delta t = t_2 - t_1$  时相对应的伸长量. 该式通常可简单表示为

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \Delta t} \quad (4)$$

式中  $L$  为物体的原长,  $\Delta L$  为固体在温度变化为  $\Delta t$  时的伸长量. 在温度变化不大的范围内,固体的线胀系数可以认为是与温度无关的常量. 大多数金属的线膨胀系数在  $(0.8 \sim 2.5) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$  之间.

## 2 测量数据处理与分析

千分表是一种通过齿轮的多级增速作用,利用齿条齿轮或杠杆齿轮传动,将测杆的微小直线位移转换为圆盘上指针读数变化的测量工具. 该实验装置直观、简便,测量精度高. 本实验分别采取持续升温大间隔  $5^\circ\text{C}$ 、持续升温小间隔  $2^\circ\text{C}$ 、设定升温大间隔  $5^\circ\text{C}$  和设定升温小间隔  $2^\circ\text{C}$  4种方法测定金属 Al 的线胀系数. 根据 PID 温控仪传感器的灵敏度将温度范围确定为  $45.0 \sim 65.0^\circ\text{C}$  (大间隔) 和  $51.0 \sim 59.0^\circ\text{C}$  (小间隔).

### 2.1 持续升温大间隔 $5^\circ\text{C}$

金属 Al 棒从室温  $26.2^\circ\text{C}$  开始持续升温至  $65.0^\circ\text{C}$ ,样品稳定后从  $45^\circ\text{C}$  时开始每隔  $5^\circ\text{C}$  记录伸长量  $\Delta L$ . 表 1 为持续升温  $5^\circ\text{C}$  下的金属 Al 线胀系数实验数据.

利用 Origin 软件分析表 1 数据可得 Al 的  $\alpha =$

$1.78 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ,与理论值  $\alpha = 2.32 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$  相比相对误差为  $23.2\%$ ,误差很大.

表 1 持续升温大间隔  $5^\circ\text{C}$  下的金属 Al 线胀系数

$L_1/\text{mm}$	$t_1/^\circ\text{C}$	$t_2/^\circ\text{C}$	$\Delta L/\text{mm}$	$\alpha/(\times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$
399.1	23.5	45.0	0.142 3	1.658 38
399.1	23.5	50.0	0.185 1	1.750 16
399.1	23.5	55.0	0.226 1	1.798 49
399.1	23.5	60.0	0.268 1	1.840 44
399.1	23.5	65.0	0.309 1	1.866 25

### 2.2 持续升温小间隔 $2^\circ\text{C}$

从室温  $26.2^\circ\text{C}$  开始持续升温至  $59.0^\circ\text{C}$ ,样品稳定后从  $51^\circ\text{C}$  时开始每隔  $2^\circ\text{C}$  记录伸长量  $\Delta L$ . 表 2 为持续升温小间隔  $2^\circ\text{C}$  下的金属 Al 线胀系数实验数据.

表 2 持续升温小间隔  $2^\circ\text{C}$  下的金属 Al 线胀系数

$L_1/\text{mm}$	$t_1/^\circ\text{C}$	$t_2/^\circ\text{C}$	$\Delta L/\text{mm}$	$\alpha/(\times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$
399.1	23.5	51.0	0.193 1	1.759 41
399.1	23.5	53.0	0.208 8	1.773 48
399.1	23.5	55.0	0.226 1	1.798 49
399.1	23.5	57.0	0.242 5	1.813 78
399.1	23.5	59.0	0.259 1	1.828 76

根据表 2 可得 Al 的  $\alpha = 1.79 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ,与理论值  $\alpha = 2.32 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$  相比相对误差为  $22.6\%$ ,误差依旧很大.

因本实验加热系统具有热惯性和 PID 温控仪传感器滞后性,瞬时温度并不是其实际温度. 所以采用持续升温法误差较大,不适合实验教学. 但是小间隔比大间隔持续升温法获得的  $\alpha$  值更稳定.

### 2.3 设定升温大间隔 $5^\circ\text{C}$

设定温度  $45^\circ\text{C}$ ,从室温  $26.2^\circ\text{C}$  开始升温至  $45.0^\circ\text{C}$  时记录伸长量  $\Delta L$ ,设定温度每间隔  $5^\circ\text{C}$  记录伸长量  $\Delta L$ . 表 3 为  $45.0 \sim 65.0^\circ\text{C}$  间隔  $5^\circ\text{C}$  下的金属 Al 线胀系数实验数据.

根据表 3 可得 Al 的  $\alpha = 2.01 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ,与理论值  $\alpha = 2.32 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$  相比相对误差为  $4.74\%$ ,误差较大. 故此方法也不适合实验教学.

使用设定法可以避免加热系统的热惯性和PID温控仪传感器滞后性带来的实验误差,但是温度间隔过大,很难保证金属的线胀系数是一个与温度无关的常量,所以设定升温大间隔法获得的 $\alpha$ 值仍不够准确.

表3 设定升温大间隔 $5^{\circ}\text{C}$ 下金属Al线胀系数

$L_1/\text{mm}$	$t_1/^{\circ}\text{C}$	$t_2/^{\circ}\text{C}$	$\Delta L/\text{mm}$	$\alpha/(\times 10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1})$
399.1	23.5	45.0	0.168 3	1.961 39
399.1	23.5	50.0	0.211 7	2.001 67
399.1	23.5	55.0	0.253 9	2.019 62
399.1	23.5	60.0	0.295 2	2.026 48
399.1	23.5	65.0	0.336 1	2.029 26

设定升温大间隔 $5^{\circ}\text{C}$ 下的金属Al线胀系数如图1所示.

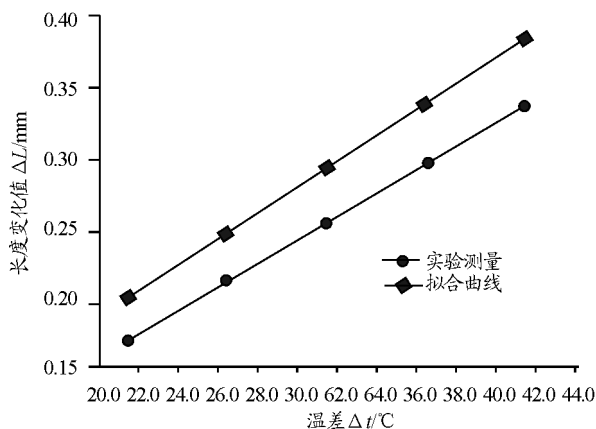


图1 设定升温大间隔 $5^{\circ}\text{C}$ 下的金属Al线胀系数

#### 2.4 设定升温小间隔 $2^{\circ}\text{C}$

设定温度 $51^{\circ}\text{C}$ ,从室温 $21.9^{\circ}\text{C}$ 开始升温至 $51.0^{\circ}\text{C}$ 时记录伸长量 $\Delta L$ ,设定温度每间隔 $2^{\circ}\text{C}$ 记录伸长量 $\Delta L$ .表4为 $51.0\sim 59.0^{\circ}\text{C}$ 间隔 $2^{\circ}\text{C}$ 下的金属Al线胀系数实验数据.

表4 设定升温小间隔 $2^{\circ}\text{C}$ 下金属Al线胀系数

$L_1/\text{mm}$	$t_1/^{\circ}\text{C}$	$t_2/^{\circ}\text{C}$	$\Delta L/\text{mm}$	$\alpha/(\times 10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1})$
399.1	23.5	51.0	0.220 8	2.360 77
399.1	23.5	53.0	0.229 0	2.345 11
399.1	23.5	55.0	0.236 8	2.326 66
399.1	23.5	57.0	0.244 7	2.310 42
399.1	23.5	59.0	0.251 4	2.286 13

根据表4数据得Al的 $\alpha=2.325\ 82\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,与理论值 $\alpha=2.32\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 相比相对误差仅为 $0.25\%$ ,误差最接近理论值且耗时较短,适合实验教学.图2为设定升温小间隔 $2^{\circ}\text{C}$ 下的金属Al线胀系数.

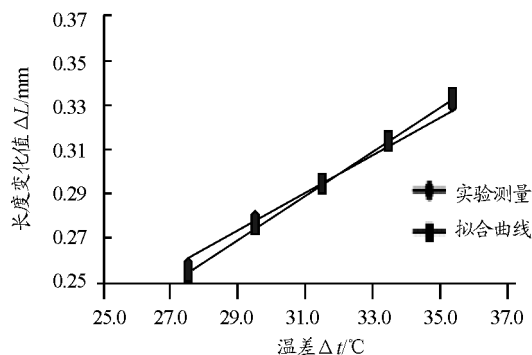


图2 设定升温小间隔 $2^{\circ}\text{C}$ 下的金属Al线胀系数

用最小二乘法进行数据处理,拟合曲线与实验数据的拟合相似度 $R=0.999\ 8$ ,拟合度非常高.从 $51.0\sim 59.0^{\circ}\text{C}$ 下的金属Al线胀系数可以看出,该实验传感器在 $55^{\circ}\text{C}$ 附近的温度值较为准确,所以可以判定该传感器感应温度为 $55^{\circ}\text{C}$ .因此使用小间隔设定法即可以避免加热系统的热惯性和PID温控仪传感器滞后性带来的实验误差,又可以保证金属的线胀系数是一个与温度无关的常量,所以小间隔设定升温法获得的 $\alpha$ 值最接近理论值.

### 3 结束语

本实验分别采取持续升温大间隔 $5^{\circ}\text{C}$ 、持续升温小间隔 $2^{\circ}\text{C}$ 、设定升温大间隔 $5^{\circ}\text{C}$ 和设定升温小间隔 $2^{\circ}\text{C}$ 4种改变温度法测定金属Al的线胀系数.因本实验加热系统具有热惯性和PID温控仪传感器滞后性,瞬时温度不是实际温度,故采用持续升温法误差较大,但小间隔比大间隔持续升温法获得的 $\alpha$ 值更稳定.小范围设定温度法获得的线胀系数比大范围设定温度法测出的线胀系数要更精确,并且从 $51.0\sim 59.0^{\circ}\text{C}$ 下的金属Al线胀系数可以看出,该实验传感器在 $55^{\circ}\text{C}$ 附近的温度值较为准确,故可判定PID温控仪整定温度为 $55^{\circ}\text{C}$ .利用Origin软件分析设定升温法(小间隔 $2^{\circ}\text{C}$ )的实

验值  $\alpha = 2.21 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ , 与理论值  $\alpha = 2.32 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$  相比相对误差仅为 4.74%, 用最小二乘法拟合曲线与实验数据的拟合相似度为 0.999 8, 拟合度非常高. 故设定升温小间隔  $2^\circ\text{C}$  法适合本实验教学.

### 参考文献

- [1] 于莉莉, 苏靖文, 陆思琦. 金属线胀系数测量的误差分析[J]. 大学物理实验, 2015, 28(6): 98 - 101.
- [2] 谢宁, 李华振, 张季. 千分表法测量金属线胀系数实验分析[J]. 大学物理, 2017, 36(12): 34 - 36, 46.
- [3] 骆敏, 骆泽如, 陈蕾, 等. 多重反射激光光杠杆测量金属线胀系数[J]. 物理实验, 2018, 38(7): 14 - 16, 22.
- [4] 张定梅, 蒋再富, 孙宪钢. 基于迈克尔孙干涉仪测金属线

- 胀系数[J]. 实验室科学, 2018, 21(4): 20 - 22.
- [5] 郑光平, 李锐锋. 单缝衍射测量金属线胀系数[J]. 物理实验, 2008, 28(9): 36 - 37.
- [6] 安奎生, 张娟, 郭静杰. 用组合测量方法测金属线胀系数[J]. 物理实验, 2008, 28(10): 33 - 35.
- [7] 络敏, 陈雷, 余观夏, 等. 游标卡尺在金属线胀系数测量中的应用[J]. 大学物理实验, 2017, 30(6): 79 - 80.
- [8] 丁慎训, 张连芳. 物理实验教程[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [9] 谢行恕, 康士秀, 霍剑青. 普通物理实验(第二册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 23 - 27.
- [10] 杨述武等. 普通物理实验: 一、力学及热学部分[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 218 - 222.

## Study on the Effect of Setting Temperature on Linear Expansion Coefficient of Metal

WANG Bo LIU Yunhu YANG Kun WANG Xueyan FAN Ting

(Shihezi University College of Science Key Laboratory of Eco-Physics, Shihezi, Xinjiang 832003)

LU Yandong

(Shihezi University Office of Academic Affairs, Shihezi, Xinjiang 832003)

**Abstract:** In this experiment, the linear expansion coefficient of metal Al was determined by four methods: continuous temperature rise (5 degrees Celsius of large interval), continuous temperature rise (2 degrees Celsius of large interval), setting temperature rise (5 degrees Celsius of large interval) and setting temperature rise (2 degrees Celsius of large interval). It can be seen from the experimental results that the error of metal Al expansion coefficient measured by the continuous temperature rising method is larger than that measured by the setting temperature rising method, because the heating system in this experiment has thermal inertia and the hysteresis of PID temperature controller sensor, so the instantaneous temperature is not the actual temperature. The linear expansion coefficient obtained by the method of setting temperature with small intervals is more accurate than that measured by the method of setting temperature with large intervals. The relative error of the method of setting temperature with small intervals is only 0.25%. The fitting similarity between the curve and the experimental data by using the least square method is 0.999 8, which is of high fitting degree and short time consuming. Therefore, the small interval setting temperature rise method is suitable for this experiment teaching.

**Key words:** linear expansion coefficient; dial gauge; setting temperature method; PID temperature controller