

# 基于半导体激光器的热电偶时间常数 测试系统及不确定度分析

郝晓剑 张根甫\* 答清波

中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051

**摘要** 针对热电偶时间常数的测试,采用上升时间为  $0.6 \mu\text{s}$ 、功率为  $500 \text{ W}$  的半导体激光器取代  $\text{CO}_2$  激光器作为激励源,通过对激光光束的整形优化,在  $20 \text{ V}$  工作电压和  $20 \text{ A}$  工作电流条件下,利用半导体激光器在热电偶测温端形成  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$  阶跃温度。对测量结果进行小波降噪处理,建立测量模型。分析测量结果的不确定度来源,评定测量结果不确定度。实验测得时间常数为  $1.3268 \text{ s}$ ,扩展不确定度为  $1.12 \text{ ms}$ 。通过提高激光器输出功率,可在热电偶测温端产生更高的阶跃温度,以实现大量程热电偶时间常数的测试。

**关键词** 激光器; 半导体激光器; 热电偶; 时间常数; 不确定度

**中图分类号** TB942; TM930.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.081408

## Thermocouple Time Constant Test System and Uncertainty Analysis Based on Semiconductor Lasers

Hao Xiaojian Zhang Genfu Zan Qingbo

National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University  
of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** In view of the thermocouple time constant test, the semiconductor laser with  $0.6 \mu\text{s}$  rise time and  $500 \text{ W}$  power is selected as the excitation source instead of the  $\text{CO}_2$  laser. By shaping the laser beam,  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$  step temperature at the measuring side of the thermocouple is achieved as the laser operates at  $20 \text{ V}$  working voltage and  $20 \text{ A}$  working current. The measurement results are processed by wavelet denoising, and the measurement model is established. The uncertainty of the measurement results is evaluated by analyzing its sources. The measured time constant is  $1.3268 \text{ s}$ , and the expanded uncertainty is  $1.12 \text{ ms}$ . The time constant of large-range thermocouples can be tested through increasing the laser power and producing a higher step temperature at the measuring side of the thermocouple.

**Key words** lasers; semiconductor lasers; thermocouple; time constant; uncertainty

**OCIS codes** 140.5960; 140.3510; 120.6780; 120.3940

## 1 引言

温度是生产过程中最重要的参数之一,随着温度动态测试需求与日俱增,温度传感器动态特性引起研究者们越来越多的重视<sup>[1]</sup>。热电偶具有结构简单、测温范围广、准确度高等优点,是应用最广泛的温度传感器。热电偶时间常数是指热电偶对阶跃温度响应输出达到阶跃温度量的  $63.2\%$  所需要的时间,通常可直接从响应曲线上计算得到。时间常数是热电偶重要的动态特性指标之一,也是热电偶研发和使用的重要依据。针对大量程热电偶时间常数测试,在热电偶测温端形成大的阶跃温度量极为困难。激光不仅本身具有极高的能量,还可通过光学聚焦将能量会聚于一点(小于  $0.1 \text{ mm}$ ),从而得到极高能量密度(大于  $10^{12} \text{ W/cm}^2$ ),可

**收稿日期:** 2016-04-25; **收到修改稿日期:** 2016-05-09; **网络出版日期:** 2016-07-21

**基金项目:** 国防基础科研项目(JSJC2013408C009)、国家自然科学基金(61473267)

**作者简介:** 郝晓剑(1969—),女,博士,教授,主要从事动态测试与光电仪器方面的研究。E-mail: zhang\_\_gf@163.com

\* **通信联系人.** E-mail: 383635691@qq.com

在极短时间内在材料局部表面形成高温<sup>[2-4]</sup>。与投入实验法<sup>[5]</sup>、热风洞法<sup>[6]</sup>、激波管法相比,采用激光在热电偶测温端形成的温度信号具有幅值大、上升时间短、接近理想阶跃温度信号等优点。

本文采用上升时间为  $0.6 \mu\text{s}$ 、功率为  $500 \text{ W}$  的半导体激光器取代 K-500 型  $\text{CO}_2$  激光器测试热电偶时间常数,对激光光束进行优化整形,分析光束质量。测试某 K 型热电偶,针对测试结果进行小波降噪,给出不确定度评定的方法和步骤,分析各个不确定度分量的来源及其对测量结果的影响,并提出减小不确定度的改进措施,为准确测量热电偶时间常数提供参考。

## 2 测试原理与测试系统

### 2.1 测试原理

在热电偶时间常数的测试中,通过在热电偶测温端形成阶跃温度,从而获取热电偶的响应曲线,计算示意图如图 1 所示。图中  $T_0$  为热电偶测温端初始温度,一般为环境温度; $T_e$  为阶跃温度,通过读取热电偶输出稳定后数据确定; $t_1$  为热电偶响应输出时刻; $t_2$  为热电偶指示温度与初始温度之差  $(T - T_0)$  达到阶跃温度量  $(T_e - T_0)$  的 63.2% 的时刻。用  $\tau$  表示热电偶时间常数,可得  $\tau = t_2 - t_1$ 。

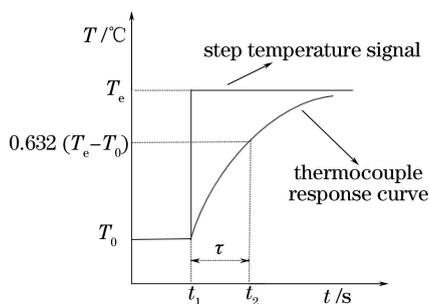


图 1 热电偶时间常数计算示意图

Fig. 1 Schematic of thermocouple time constant calculation

### 2.2 测试系统

实验室之前采用 K-500 型  $\text{CO}_2$  激光器,其平均功率为  $500 \text{ W}$ ,激光波长为  $10.6 \mu\text{m}$ ,波长不属于可见光波段,激光需经过光隔离器、全反射镜、离轴抛物镜等会聚至热电偶测温端,光路复杂,调节困难,且激光能量衰减较大,系统示意图如图 2 所示。此外, $\text{CO}_2$  激光器输出非连续,当周期性方波频率较高时,激光器输出还未达到上升高度就开始下降(激光器上升时间为  $72 \mu\text{s}$ ),难以对热电偶测温端持续均匀地加热。

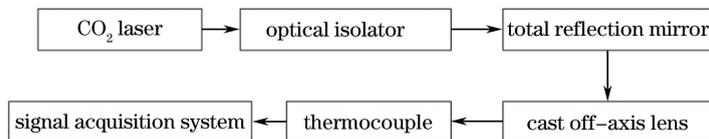


图 2  $\text{CO}_2$  激光器测试系统

Fig. 2  $\text{CO}_2$  laser measurement system

为解决以上问题,系统采用半导体激光器(DILAS 公司,德国),其输出功率为  $500 \text{ W}$ ,激光中心波长为  $0.98 \mu\text{m}$ ,与之前的  $\text{CO}_2$  激光器相比,波长较短,光子能量大,减弱了热电偶测温端对激光的反射,增强了透射能力,使得激光光束光热转换效率更高,在热电偶测温端形成更高的阶跃温度。

半导体激光器采用光纤输出,输出激光可直接作用于热电偶测温端,与之前的  $\text{CO}_2$  激光器相比,光路结构更加简单且便于调节,同时提高了对激光的利用率。此外,半导体激光器输出脉冲上升时间短,约为  $0.6 \mu\text{s}$ ,可测试时间常数为毫秒级的热电偶<sup>[7]</sup>。

半导体激光器输出激光存在一定的发散角,使激光光斑过大,降低了激光束能量密度,故需对激光光束进行聚焦。聚焦后的激光光斑若太小,不能覆盖热电偶测温端,则不能保证热电偶测温端受热均匀,给测量带来不确定性。透镜越多,激光光束衰减越严重,故采用单透镜对激光光束进行聚焦。

设光纤输出端与聚焦透镜的距离为  $p$ ,像距为  $q$ ,透镜焦距为  $f$ ,高斯成像公式为

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

已知光纤数值孔径为 0.2, 设发散角为  $\alpha$ , 则  $\sin \alpha = 0.2$ , 激光光斑在透镜处半径  $d$  满足

$$\sin \alpha = \frac{d}{\sqrt{d^2 + p^2}} = 0.2 \quad (2)$$

设透镜半径为  $r$ , 则应满足  $d \leq r$ , 以保证激光光束完全通过透镜。由于光纤输出端头部带有螺纹, 故采用长套筒结构, 套筒一端与光纤前端连接, 另一端用于固定聚焦透镜。该结构一方面可保证激光光束中心与聚焦透镜同轴, 另一方面便于安装调节, 装配图如图 3 所示, 可得光纤前端与透镜物距  $p$  为 52 mm, 选用半径为 12.5 mm、焦距为 45 mm 的石英透镜, 则激光光斑在透镜处半径  $d$  为 11.75 mm (小于 12.5 mm), 满足条件。

采用激光光束分析仪, 在距离透镜 440 mm 处测试激光光斑, 此处激光光斑直径约为 3.9 mm, 能量密度最高区域直径约为 3 mm, 激光能量分布如图 4 所示。激光能量由内及外递减, 红色区域能量最高, 能量均匀度为 0.75, 热电偶测温端直径一般小于 2 mm, 因此可保证热电偶测温端全部覆盖且受热均匀<sup>[8]</sup>。

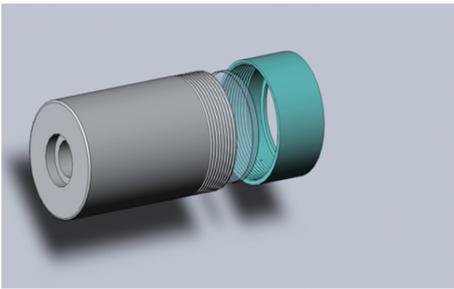


图 3 聚焦透镜装配图

Fig. 3 Assembly drawing of focusing lens

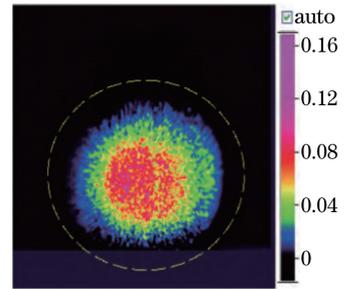


图 4 激光光斑分析

Fig. 4 Analysis of laser spot

### 3 测试过程与测试结果处理

实验过程中, 固定热电偶测温端与透镜的距离为 44 cm, 调节激光器驱动电源, 确定激光器输入电压 20 V, 输入电流 25 A (小于激光器最大工作电流 65 A), 测试某 K 型热电偶, 采用小波降噪的方法处理测试结果, 使用 db4 小波进行 10 级分解, 结果如图 5 所示, 其中蓝色代表带有噪声的输出信号, 红色代表滤波后的信号, 在时间常数评定中读取滤波后的信号可有效避免噪声对阶跃温度的影响, 根据热电偶输出电压及分度表, 得热电偶最后输出温度约为 1050 °C。激光器并未满功率输出, 若增大激光器工作电流, 则可实现更高的阶跃温度量, 激光器余量较大。

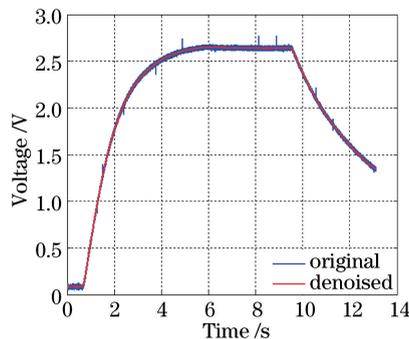


图 5 测试结果滤波处理

Fig. 5 Filtering process of test results

### 4 测量结果不确定度评定

测量不确定度是指测量结果变化的不肯定, 是表征被测量的真值在某一个量值范围的估计, 是测量结果含

有的一个参数,用以表示被测量值的分散性。测量不确定度是评定测量结果质量高低的一个重要指标,比误差易于理解,便于评定,具有合理性和易用性<sup>[9]</sup>。同时,通过评定测量结果的不确定度,改进测试系统中引入较大不确定度的部分,可有效提高测量结果质量和测量水平<sup>[10]</sup>。采用 GUM 法评定测量结果的不确定度<sup>[11]</sup>。

#### 4.1 测量模型及输入量的标准不确定度

对于直接从热电偶输出响应曲线上获取时间常数的情况,测量模型为

$$\tau = f(t_1, t_2) = t_2 - t_1, \quad (3)$$

式中  $t_2$  时刻为热电偶指示温度与初始温度之差  $(T - T_0)$  达到阶跃温度量  $(T_e - T_0)$  的 63.2% 的时刻,  $t_1$  为热电偶响应输出时刻。输入量  $t_1$  引入的不确定度主要来源于时间计量,按 B 类不确定度评定。被测量  $t_1$  的可能区间半宽度  $a = 0.24$  ms,按正态分布,取概率  $P = 0.95$ ,得置信因子  $k = 1.960$ ,则输入量  $t_1$  带来的标准不确定度为

$$U(t_1) = \frac{a}{k} = \frac{0.24}{1.960} = 0.12 \text{ ms}。 \quad (4)$$

根据热电偶响应曲线及分度表,输入量  $t_2$  与热电偶指示温度  $T$  之间存在一一对应的关系。指示温度  $T$  的计算公式为

$$T = T_0 + 0.632(T_e - T_0), \quad (5)$$

式中  $T_0$  为常量,代表环境温度;  $T_e$  为阶跃温度。激光与热电偶测量端、热电偶测量端与环境等相互作用造成热电偶在输出稳定时处于动态平衡,因此获取的阶跃温度  $T_e$  不是一个确定的值。通过多次读取阶跃温度  $T_e$ ,进而获取输入量  $t_2$ ,测试数据结果如表 1 所示。

表 1 测试数据  
Table 1 Test data

$n$	$T_e / ^\circ\text{C}$	$T / ^\circ\text{C}$	$t_2 / \text{s}$
1	1070	683.600	1.9472
2	1060	677.280	1.9461
3	1037	662.744	1.9428
4	1058	676.016	1.9451
5	1046	668.432	1.9436
6	1035	661.480	1.9426
7	1040	664.640	1.9432
8	1051	671.592	1.9440
9	1040	664.640	1.9432
10	1030	658.320	1.9425

根据贝塞尔公式计算输入量  $t_2$  引入的标准不确定度  $U(t_2)$ 。输入量  $t_2$  的算术平均值为

$$\bar{t}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_2 = 1.9440 \text{ s}, \quad (6)$$

进而可得输入量  $t_2$  的算术平均值标准偏差为

$$s(\bar{t}_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (t_{2i} - \bar{t}_2)^2 / [n(n-1)]} = 0.55 \text{ ms}。 \quad (7)$$

根据(6)、(7)式求得  $t_2$  算术平均值为 1.9440 s,算术平均值标准偏差为 0.55 ms。则输入量  $t_2$  带来的标准不确定度  $U(t_2) = s(\bar{t}_2) = 0.55$  ms。

#### 4.2 测试结果的合成标准不确定度及扩展不确定度

由于输入量  $t_1$  与  $t_2$  不相关,合成标准不确定度为  $U_c(\tau) = \sqrt{U^2(t_1) + U^2(t_2)} = 0.56$  ms,取置信因子  $k = 2$ ,则扩展不确定度  $U = 2U_c(\tau) = 1.12$  ms,所确定的区间包含概率约为 95%。测量结果的最佳估计值

$\tau = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (t_{2i} - t_1) = 1.3268$  s。因此,测量结果和不确定度表示为  $\tau = 1.3268$  s,  $U_{95} = 1.12$  ms,  $k = 2$ 。

### 4.3 分析与讨论

分析测量结果,发现测量结果不确定度主要来源于输入量  $t_2$ ,引起输入量  $t_2$  不确定度的主要原因是热电偶处于动态平衡,热电偶测温端吸收激光光束能量的同时,自身存在热辐射、热对流以及热传导。为了减小输入量  $t_2$  引入的不确定度,应保证激光器输出过程尽量稳定,例如要避免因驱动电源输出波动造成的激光器输出波动。另外,根据理论计算,加热时间越长,热电偶越接近阶跃温度,因此在读取热电偶输出数据时应尽量取用激光器停止输出之前的数据。

## 5 结 论

采用半导体激光器取代 CO<sub>2</sub> 激光器,对激光光束进行优化整形,激光器在小于半满功率条件下,测试某 K 型热电偶,实现 1050 °C 阶跃温度量,评定测试结果的不确定度,指出了测量不确定度的主要来源并提出减小测量不确定度的措施,为实现热电偶时间常数的准确测量提供指导。

### 参 考 文 献

- Zhang Genfu, Hao Xiaojian, Sang Tao, *et al.* Study on the dynamic response of thermocouple temperature sensor[J]. *China Measurement & Test*, 2015, 41(10): 68-72.  
张根甫, 郝晓剑, 桑涛, 等. 热电偶温度传感器动态响应特性研究[J]. *中国测试*, 2015, 41(10): 68-72.
- Lei Sheng, Ren Jingming, Shi Chao, *et al.* Impact toughness and fracture mechanism of the surface laser hardened components of 45 steel[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 011408.  
雷声, 任静明, 石超, 等. 表面激光相变硬化 45 钢的冲击韧性及其断裂机理[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(1): 011408.
- Fu FuXing, Chang Gengrong, Zhao Xiaoxia, *et al.* Influence of laser spot diameter on cladding layer cracking[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 031401.  
付福兴, 畅庚榕, 赵小侠, 等. 激光光斑直径对熔覆层裂纹的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 031401.
- Chen Hong, Li Zhuguo, Yao Chengwu, *et al.* Research on microstructure and properties of fiber laser repairing ZM5 magnesium alloy thin-walled casting[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0203002.  
陈宏, 李铸国, 姚成武, 等. ZM5 镁合金薄壁铸件光纤激光补焊工艺与组织性能研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0203002.
- Wu Fang, Yang Xinyuan, Wang Li. Study on measuring time constants of surface temperature sensors[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2014, 34(4): 60-62.  
吴方, 杨新圆, 王莉. 表面温度传感器时间常数测量方法研究[J]. *计测技术*, 2014, 34(4): 60-62.
- 王松涛, 赵俭, 金振涛. 蓝宝石光纤黑体腔时间常数测量的不确定度分析[J]. *工业计量*, 2013, 23(3): 53-54.
- Yang Yu. Test analysis of rise time of semiconductor laser based on thermocouple dynamic calibration system[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2014, 29(2): 95-98.  
杨宇. 基于热电偶动态校准系统的半导体激光器上升时间测试分析[J]. *光电技术应用*, 2014, 29(2): 95-98.
- Zan Qingbo, Hao Xiaojian, Zhou Hanchang. Design of laser light path of optical fiber coupling lens[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 102201.  
笱清波, 郝晓剑, 周汉昌. 基于 Zemax 光纤耦合透镜激光光路设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 102201.
- Fang Zheng, Pan Yi, Jiang Yuejun, *et al.* Study on evaluation methods for weighing relative standard uncertainty of gas reference materials prepared by weighing method[J]. *China Measurement & Test*, 2012, 38(6): 5-8.  
方正, 潘义, 江月军, 等. 称量法制备气体标准物质的称量相对标准不确定度评定方法研究[J]. *中国测试*, 2012, 38(6): 5-8.
- Chen Guisheng, Fu Zhiyong, Zhao Jing, *et al.* Research on improving method of the credibility of industrial platinum resistance verification results at a low cost[J]. *China Measurement & Test*, 2015, 41(1): 24-28.  
陈桂生, 付志勇, 赵晶, 等. 低成本提高工业铂电阻检定结果可信度方法研究[J]. *中国测试*, 2015, 41(1): 24-28.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Evaluation and expression of uncertainty in measurement: JJF1059.1-2012[S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2013.  
国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF1059.1-2012[S]. 北京: 中国质检出版社, 2013.