

# 光纤瞬态高温传感器及动态测试系统

王玉田 杨丽丽 鲁信琼

(燕山大学测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要** 为了解决特殊环境下的瞬态高温测量,设计了一种基于黑体辐射的光纤高温传感器及动态测试系统。根据辐射测温的基本原理,结合光纤传感技术,采用了“接触-非接触”测量方法和光纤光栅窄带滤波技术,提高了测量精度,减小了背景光的影响。由于瞬态温度随时间变化快,动态误差大,探索了一种利用大功率高频 CO<sub>2</sub> 激光器作为激励源,用激光脉冲加热被校传感器。用测得的温度信号对被校传感器进行可溯源高温动态校准的新方案。实验结果表明,系统测温范围为 800~2000 °C,并具有精度高,响应快,抗电磁干扰,性能稳定的特点,解决了热电偶响应速度慢,寿命短的缺陷,为冶金、石油、化工、武器研制等领域的瞬态高温测量提供了一种新的测试手段。

**关键词** 测量; 光纤高温传感器; 动态校准; 黑体辐射; 光纤光栅; 可溯源

中图分类号 TH81 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s2.0358

## Optical Fiber Transient High-Temperature Sensor and Dynamic Testing System

Wang Yutian Yang Lili Lu Xinqiong

(Measurement Technology and Instrumentation Key Laboratory of Hebei Province, Yan Shan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract** In order to provide a solution for transient high-temperature measurement under special circumstances, an optical fiber high-temperature sensor and dynamic calibration system based on the mechanism of blackbody radiance are designed. According to the basic principle of radiance temperature measurement and combining the sensor technology of optical fiber, “touchable-untouchable” measuring method and “fiber grating narrowband filters” technology are used to improve the measuring accuracy and decrease the influence of light background. Because the transient temperature changing very quickly with time and dynamic response error is great, a new principle is proposed. A high frequency modulated high power CO<sub>2</sub> laser is used as the driving source to heat up the sensor calibrated. Using the temperature signal obtained, high-temperature dynamic calibration can be carried. The testing results show that the temperature measurement range is from 800~2000 °C, and the system has many advantages such as high accuracy, fast response, anti-electromagnetic disturbance as well as high reliability. It solved the limitation of thermocouple, such as slow response and short life, and provided a new measuring method to transient high-temperature measurement in metallurgy, petroleum, industry and weapon development fields.

**Key words** measurement; optical fiber high-temperature sensor; dynamic calibration; blackbody radiance; fiber grating; traceability

## 1 引 言

高温、强侵蚀介质、强热震性的温度测量在冶金、石油化工、建材、武器研制等工程技术领域中十分常见,如钢水的连续测温、重油裂化炉内温度测量等。这些对象需要测量的是瞬态温度,其工作特点是

温度高,变化快,常为不可重复的一次性过程,而且测量条件恶劣、技术难度高。因此,研究一种能够在恶劣环境下实现瞬态高温测试的系统对提高产品质量、减少废品率,节约能源和原材料,降低成本、提高劳动生产率等方面具有重要的研究意义和经济效益。

**基金项目:** 国家自然科学基金(60672015)资助课题。

**作者简介:** 杨丽丽(1982-),女,硕士研究生,主要从事光电检测与光纤传感等方面的研究。E-mail: lily\_lucky@qq.com

**导师简介:** 王玉田(1952-),男,教授,博士生导师,主要从事检测技术与光电传感器等方面的研究。

E-mail: y. t. wang@163.com

由于工业生产、科学研究与开发和生物学等领域对温度测量设备日益增长的需求,温度测试技术在不断的进步<sup>[1~4]</sup>,因而也对恶劣环境下高温的精确测量提出了更高的要求,尤其是瞬态温度的动态测量技术<sup>[5,6]</sup>。

## 2 系统结构及原理

### 2.1 系统结构

光纤高温测试系统采用“接触—非接触”测量方法<sup>[7]</sup>,系统如图 1 所示。主要由黑体腔探头、透镜组、光纤准直器、传输光纤、光纤环行器、光纤光栅滤波器、光电探测器、信号放大电路、数据采集系统和计算机构成。

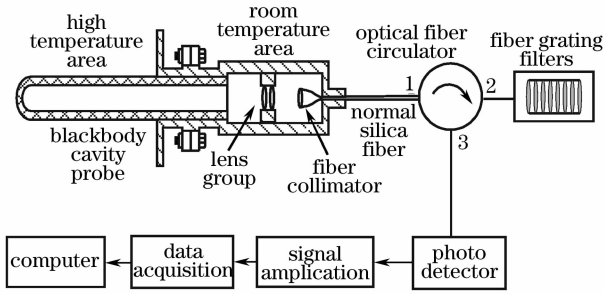


图 1 光纤高温测试系统框图

Fig. 1 Block diagram of optical fiber high-temperature measuring system

测量时将耐高温的黑体腔直接接触被测高温源,黑体腔受热发出的黑体辐射通过一个密闭空间传递到不与高温源直接接触的光纤探头。光纤探头由透镜组和光纤准直器构成,可将辐射光耦合入传输光纤,信号光经传输光纤从测量现场传至光纤环行器端口 1,由端口 2 输出的光经过光纤光栅滤波器后返回入端口 2,由端口 3 输出的信号光经光电探测器后转变为电压信号,最后经信号放大和数据采集由计算机进行数据处理和显示。

### 2.2 测温原理

辐射测温的原理是基于黑体辐射的普朗克定理,当黑体腔与待测高温区热平衡时,黑体腔按照黑体辐射定律发射与待测温度相对应的电磁辐射,其谱功率密度出射率可以用普朗克公式表示

$$E(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5 \{ \exp[C_2/(\lambda T)] - 1 \}}, \quad (1)$$

式中  $C_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^3$  为第一辐射系数;  $C_2 = 1.43879 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$  为第二辐射系数;  $\lambda$  为光谱辐射波长;  $T$  为黑体辐射温度;  $\epsilon(\lambda, T)$  为黑体腔的有效发射率,其值与设计黑体腔材料、几何尺寸等

因素有关。

设光纤探头的耦合效率为  $\eta(\lambda)$ , 光纤光栅窄带滤波器的光谱响应函数为  $R(\lambda)$ , 中心波长为  $\lambda_B$ , 带宽为  $2\Delta\lambda$ , 光电探测器 (SiPIN 管) 的光谱响应函数为  $D(\lambda)$ , 则辐射光信号经硅光探测器后输出的电压为

$$V(\lambda_B, T) = \int_{\lambda_B - \Delta\lambda}^{\lambda_B + \Delta\lambda} \eta(\lambda) R(\lambda) D(\lambda) E(\lambda, T) d\lambda, \quad (2)$$

由(2)式可知,  $\eta(\lambda)$ 、 $R(\lambda)$  和  $D(\lambda)$  与滤波器波长  $\lambda$  有关,而与被测温度  $T$  无关,所以当设计完成滤波器后,经过标定,  $\eta(\lambda)$ 、 $R(\lambda)$  和  $D(\lambda)$  都为常数。因此,输出电压可以直接反映被测体的温度大小。

### 2.3 探测器与滤波

光电探测器采用 Si-PIN 光电管,其特点是抗环境温度变化能力强,输出阻抗低。

由于光纤布拉格光栅具有中心反射波长可以精密控制、反射带宽可以任意选择且可以做得很小、反射率几乎可达 100%、与普通光纤连接简便等优点,所以我们采用光纤布拉格光栅做滤波器<sup>[8]</sup>,可以对光纤透射频谱中的任一波长进行窄带滤出。器件的性能由光纤布拉格光栅光谱特性决定,通过选择合适的中心波长和带宽,可有效减小背景光的影响,通过与环形器连接,具有很好的波长隔离度和回波损耗。

## 3 动态校准系统

由于所设计的黑体空腔具有一层、甚至两层保护套管,致使输出信号(实测温度)总是滞后于被测温度的变化,产生动态测温误差。所以对这些大惯性的温度传感器必须研究其动态特性,进行动态校准<sup>[9,10]</sup>。

### 3.1 系统组成

可溯源温度传感器动态校准的原理是借助激光脉冲作为瞬态热源,使传感器表面产生温升,以被校

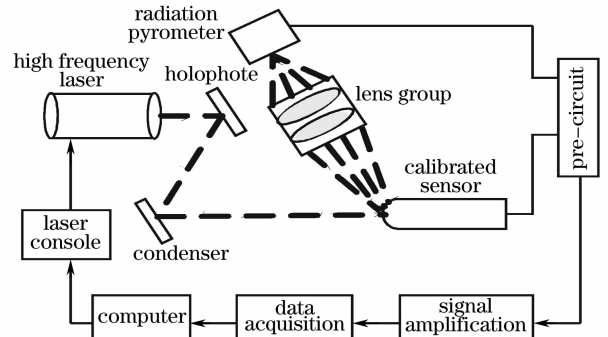


图 2 动态校准系统原理图

Fig. 2 Schematic of the dynamic calibration system

准的传感器和辐射高温计同时对热源进行测量,系统如图 2 所示。为了能使被校准的温度传感器瞬间加热到高温,加热热源必须要有足够高的功率,为了适应对瞬态高温传感器进行标定,它应具备高频调制能力。所以系统中采用了大功率高频 CO<sub>2</sub> 激光器作为加热热源来实现温度传感器的校准。

### 3.2 校准原理

如图 3 所示为动态校准过程框图,整个校准过程包括静态标定和动态校准两部分。

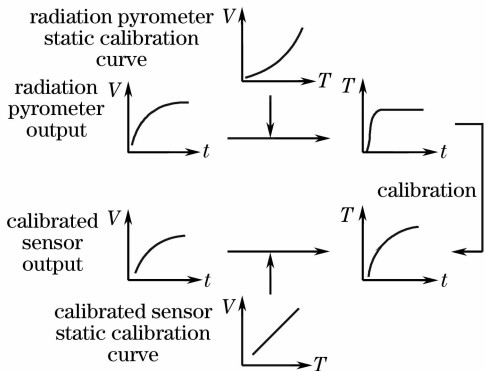


图 3 动态校准过程框图

Fig. 3 Process of the dynamic calibration

在动态标定之前要对被校传感器和辐射高温计进行静态标定,是为了确定静态测试系统的输入与输出之间的对应关系。首先,在恒温黑体炉中用标准热电偶标定被校传感器,得出被校传感器的温度电压( $T-V$ )曲线。然后将已静标的传感器和辐射高温计置于图 2 的系统中,使激光器发出一定时间的连续激光照射到被校传感器表面上,同时被校传感器表面产生的红外热辐射经透镜组聚焦于辐射高温计上。当达到热平衡时,可得出辐射高温计的温度电压( $T-V$ )曲线,实现了对辐射高温计的静态标定。

动态标定时,从某时刻开始用重复频率足够高的激光脉冲序列加热被校传感器,产生一个准阶跃温度变化。脉冲激光产生的热量被传感器表面吸收,且向内传热。被校传感器温度升高产生红外热辐射,经透镜组聚焦,被辐射高温计接收。这样即可得出在某一温度时,辐射高温计和被校传感器的电压—时间曲线。

在上述静态和动态标定的基础上,分别根据被校传感器和辐射高温计的电压—温度和电压—时间曲线得出其相应的温度—时间关系曲线。由于辐射高温计的频响特性远优于被校传感器,可将辐射高温计的响应作为被校传感器的输入信号,而被校传感器的响应曲线作为输出信号,以前者来校准后者

的动态响应特性,即用辐射高温计的温度—时间曲线校准被校传感器的温度—时间曲线。

## 4 实验结果

光纤瞬态高温传感器的性能指标调节是通过把传感器的黑体腔探头伸至碲碳炉中央,并密封炉腔,同时,把校验的热电偶伸至相同位置以测量其温度完成的。如图 4 所示。

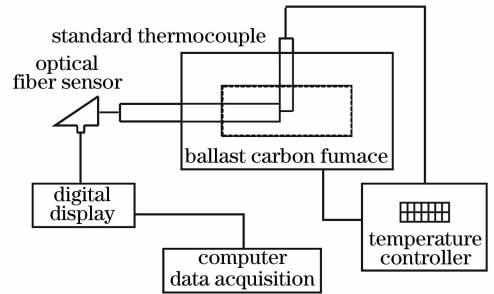


图 4 性能测试系统

Fig. 4 Testing system of performance

测温范围为 800 ~ 2000 °C,响应时间用 PHILIPAPM9080 记忆存储数字示波器测量,其功能齐全,扫描速度范围宽,测得其响应时间小于 120 ms,可对瞬态变化过程进行测试。

调节温度控制器使碲碳炉温度稳定在 1200 °C,在 6 h 内观察数字显示仪的显示值,分析计算机采集到的数据,所得最大偏差为 3 °C。

调节温度控制器,对相同测点进行重复测量,最大差值小于 4 °C。

将探头靠近 4 kHz、1 kW 高频发生器旁,示值不变。

## 5 结 论

“光纤瞬态高温传感器”采用“接触—非接触式”测量方法克服了单一的“接触式”测量的动态特性差和“非接触式”测量的可靠性、抗干扰性不高的弊端;透镜—光纤准直器组合系统实现了信号光有效耦合入光纤,提高了黑体辐射进入光纤的效率,避免了光能量的损失过大;基于光纤光栅的窄带滤波器,减小了背景光的影响,保证了仪表的稳定性、重复性,提高了温度测量的准确度;最后通过动态校准保证了测温的精确度。

此测量系统具有响应快、稳定性高、重复性好、抗电磁干扰性能强等优点,能进行特殊环境下的瞬态高温测试。在冶金、建材、机械、化工等行业的被测体温度的测量与在线控制中有着广泛的应用前

景,对产品的质量保证与控制有重要意义,尤其对军工领域具有特殊应用。

### 参 考 文 献

- 1 Castrellon-Urbe J. Experimental results of the performance of a laser fiber as a remote sensor of temperature[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**(6): 633~644
- 2 Childs P. R. N., Greenwood J. R., Long C. A.. Review of temperature measurement[J]. *Review of Scientific Instrument*, 2000, **71**(8): 2959~2969
- 3 Ye Linhua, Shen Zhongping, Tong Limin *et al.*. Study on optical properties of sapphire fiber under high temperature[C]. *SPIE*, 2002, **4919**: 161~166
- 4 Ye Linhua, Shen Yonghang, Zhao Weizhong. Sapphire fiber thermometers based on fluorescence lifetime measurement[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(8): 773~776  
叶林华,沈永行,赵渭忠. 基于荧光衰减测量的蓝宝石光纤温度计[J]. *光电子 • 激光*, 2002, **13**(8): 773~776
- 5 Zhang Guangjun, Huang Junqin, Li Xingshan *et al.*. Study on dynamic repeatability, linearity and performance improvement of temperature transducers[J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 1997, **18**(2): 92~95  
张广军,黄俊钦,李行善等. 温度传感器动态重复性、线性度与性能改进的研究[J]. *仪器仪表学报*, 1997, **18**(2): 92~95
- 6 Lan Jinhui, Zhou Hanchang, Pan Deheng. Research on laser application in the dynamic calibration system for transient surface temperature transducers [J]. *Acta Armamentarii*, 1998, **19**(1): 38~41  
蓝金辉,周汉昌,潘德恒. 激光在瞬态表面温度传感器的动态校准系统中的应用[J]. *兵工学报*, 1998, **19**(1): 38~41
- 7 Li Bing. Study on Fiber Optic Pyrometer based on Blackbody Cavity [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006. 18~25  
李兵. 基于黑体空腔的光纤高温计的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006. 18~25
- 8 Yang Yifei, Zhang Weigang, Liu Bo *et al.*. A novel fiber Bragg grating tunable filter with wide range[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(8): 910~912  
杨亦飞,张伟刚,刘波等. 一种新颖的宽带可调光纤光栅滤波器[J]. *光电子 • 激光*, 2005, **16**(8): 910~912
- 9 Castellini P., Rossi G. L.. Dynamic characterization of temperature sensors by laser excitation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1996, **67**(7): 2595~2601
- 10 Hao Xiaojian, Zhou Hanchang, Li Kejie *et al.*. Application of CO<sub>2</sub> laser to response time measurement of surface[J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 2007, **28**(6): 1041~1044  
郝晓剑,周汉昌,李科杰等. CO<sub>2</sub>激光器在表面温度传感器响应时间测量中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2007, **28**(6): 1041~1044