

文章编号:1004-4213(2010)04-0614-4

一种测量高温中间包的蓝宝石光纤温度计*

王冬生, 潘玮炜

(河北工程大学, 河北 邯郸 056001)

摘要:介绍了一种测量高温的蓝宝石光纤温度计. 蓝宝石单晶光纤由于其极好的高温物理化学性能, 适用于高温下光纤测温应用, 可用作辐射型光纤温度传感器. 蓝宝石光纤温度计采用激光加热小基座法生长出端部掺 Cr^{3+} 的蓝宝石光纤荧光温度传感头. 用激光加热小基座, 把对荧光有温度反应的材料如红宝石晶体光纤生长在蓝宝石光纤上, 制成具有结构紧凑, 耐高温, 功能稳定的传感探头. 通过荧光寿命的检测, 可以测量所对应的温度. 根据表面温度, 可以依据温度场得到内部温度, 用于测量连铸炉中的中间包钢水温度, 并给出了温度计的实验系统以及原始实验数据. 实验数据表明, 此结果精度高, 可实现非接触测量.

关键词:应用光学; 荧光温度计; 蓝宝石光纤; 中间包

中图分类号: TP212

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103904.0614

0 引言

瞬态温度测量工作的共同特点是温度高, 变化快, 可能伴有高压或高速流动, 一次性过程居多. 因此, 测量条件非常困难, 技术难度很高, 难以用传统的热电偶来进行测量, 高温高压下容易氧化变脆, 机械强度变坏, 再加其响应特性的要求, 实际上无法使用. 把辐射测温技术和光纤传感技术有机地结合起来, 可以有效地解决恶劣环境下高温测量的难题.

在各种光纤温度传感器中, 有两类具有特别重要的应用价值: 根据普朗克辐射定律, 利用物体高温热辐射进行检测的辐射型光纤温度传感器和利用物体荧光寿命与温度对应关系的荧光寿命检测型光纤温度传感器. 由于物体的热辐射随温度的升高呈近指数型增长, 辐射型光纤温度传感器在高温下具有很高的灵敏度, 但无法应用于低温区域. 相反, 由于物体的荧光仅在低温区具有可检测的荧光温度特性, 而在高温区则由于荧光淬灭以及辐射背景的增加而无法适用, 因此荧光测温型光纤温度传感器适用于低温区的温度测量. 本文将上述两种光纤温度传感器有机地结合在一起, 实现了从低温到高温的大范围温度精确测量. 利用单一光纤探头实现大范围测温具有重要的应用价值^[1-2].

1 高温计测温原理

蓝宝石单晶光纤由于其极好的高温物理化学性能, 非常适用于高温下光纤测温应用, 现已成功地用作辐射型光纤温度传感器的光纤传感头. 利用激光加热基座法(LHPG)单晶光纤生长技术, 通过在蓝宝石单晶光纤的端部掺入 Cr^{3+} 离子^[3], 可以实现光激发下的荧光发射. 通过荧光寿命的检测, 可以测量所对应的温度. 因此, 这种温度传感器将实现高温的非接触精确测温. 蓝宝石光纤黑体腔高温计是根据对传感器的辐射光信号的探测得到被测温度的. 根据 Planck 黑体辐射定律, 光纤黑体腔置于温度为 T 的区域时, 其单色辐射通量为^[4]

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{ac_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (1)$$

式中 a 为腔出口进入光纤的面积, λ 为辐射光波长, T 是绝对温度, $c_1 = 3.74183 \times 10^{-16} (\text{W} \cdot \text{m}^2)$ 为第一辐射常量, $c_2 = 1.43879 \times 10^2 (\text{mK})$ 为第二辐射常量, 设干涉滤光片的光谱响应函数为 $f(K)$, 光电探测器(PIN管)的光谱响应函数为 $D(K)$, 考虑到更一般的情况设传感头的单色发射率为 $\epsilon_A(K)$, 干涉滤光片的中心波长为 λ_0 , 带宽为 $\Delta\lambda$, 辐射光信号经光纤传入光探测器后输出的电压为

$$V(\lambda_0, T) = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} \eta(\lambda) \cdot f(\lambda) \lambda \cdot D(\lambda) \cdot \epsilon_A(\lambda) \cdot \varphi(\lambda, T) d\lambda \quad (2)$$

式中 $\eta(\lambda)$ 反映光信号传输过程中光纤(包括蓝宝石单晶光纤, 锥形光纤和传光光纤)的传输损耗, 光纤连接器和其它光学元件的插入损耗引起的辐射能损

* 河北省教育厅自然科学研究计划(2001265)资助
Tel:13111342588 Email:jackdong0226@yahoo.com.cn
收稿日期:2009-10-23 修回日期:2009-10-27

失,显然 $\eta(\lambda) < 1$, 当干涉滤光片的带宽很窄时,可以假设: $\eta(\lambda) = \eta(\lambda_0)$, $f(\lambda) = f(\lambda_0)$, $D(\lambda) = D(\lambda_0)$, 并代入式(2)可得光电探测器的电压输出为

$$V(\lambda_0, T) = \eta(\lambda_0) \cdot f(\lambda_0) \cdot D(\lambda_0) \cdot \epsilon_A(\lambda_0) \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} \varphi(\lambda, T) d\lambda \quad (3)$$

式中 $K = \eta(\lambda_0) \cdot f(\lambda_0) \cdot D(\lambda_0) \cdot \epsilon_A(\lambda_0)$,

$$R(T) = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} \varphi(\lambda, T) d\lambda$$

有

$$V(\lambda_0, T) = KR(T) \quad (4)$$

由式(4)可知,蓝宝石光纤黑体腔高温计测量高温,必须知道系数 K 的值. 理论上 K 值可由公式计算出,但因系统的复杂性和各种因素的影响,难以精确计算,因此要靠实验标定. K 为取决于光信号传输过程中各种光纤传输,耦合和其它光学元件的插入损耗,光电探测器灵敏度的系数. 若忽略温度变化引起损耗和发射率随温度的改变,它是与温度无关的装置常量,可通过静态标定得到. 由于 K 与温度无关,只需在一个温度下标定即可^[5]. 标定可在如图1的装置上进行,用计量部门检定过的钨铼高温热电偶精确控制金属传热体的温度,经标定的钨铼热电偶可测温度范围为 $1\ 000 \sim 2\ 000\ ^\circ\text{C}$, 将它和蓝宝石光纤黑体腔温度传感器置于氧乙炔焰热源所形成确定温度的区域中. 要将蓝宝石黑体腔光纤传感器与高温热电偶一起置于金属传热体的恒温区,以保证标定精度. 已知经标定的钨铼热电偶其输出电压,根据分度表可得出其对应的温度 T , 利用温度 T 以及式(1)可求出 $R(T)$, 根据公式即可求出标定系数 K , 由相应处理软件得到被测温度值^[6].

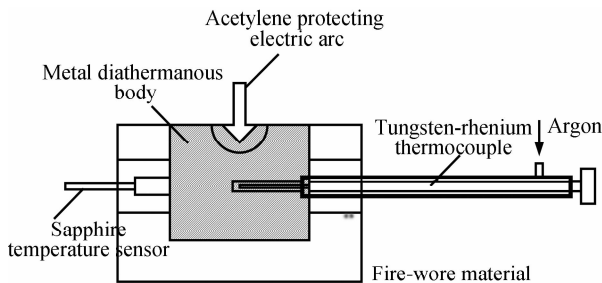


图1 标定装置
Fig. 1 The structure diagram of the demarcatio

2 蓝宝石光纤光电高温计结构

光电高温计由蓝宝石光纤黑体腔传感器, 锥度光纤, 传导光纤, 温度测量光电放大器, 数据采集装置及测温软件等部分组成, 如图2.

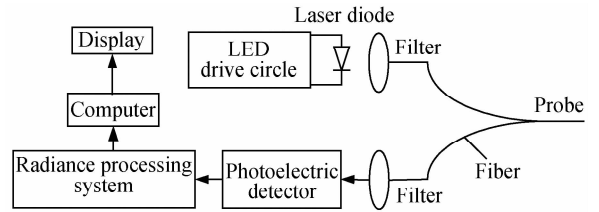


图2 光电高温计
Fig. 2 Block diagram of the sapphire fiber thermometer

黑体腔传感器置于温度测点上, 传感器通过螺纹与测点的传感器安装螺纹可靠连接. 传感器外有充以隔热材料的金属保护套管, 以防止高速, 高压燃气气流对传感器的烧蚀作用. 波长为 λ 的单色辐射通量由 Planck 黑体辐射定律决定, 辐射通过直径为 $0.8\ \text{mm}$ 的蓝宝石光纤经大端为 $0.9\ \text{mm}$ 小端为 $0.2\ \text{mm}$ 的锥度光纤与 $0.2\ \text{mm}$ 的传导光纤耦合, 锥形光纤一方面与蓝宝石光纤耦接以传输能量, 另一方面与普通光纤耦合便于远距离传输. 在较高温度区或需要固定弯曲半径的地方的传导光纤外表有耐高温隔热材料保护, 最外层为铠装不锈钢保护套. 辐射光信号由光纤传导后经耦合模块到带尾纤的光电探测器件. 光电探测器将光信号转变为电信号, 由数据采集部分采集, 采集得到的数据, 经专用测温软件处理得出温度时间对应曲线.

2.1 蓝宝石光纤黑体腔传感器

蓝宝石为人工生长的氧化铝 (Al_2O_3), 其热稳定性好, 强度高, 本质绝缘, 耐腐蚀, 熔点很高, 可达 $2\ 045\ ^\circ\text{C}$, 在 $0.14 \sim 6.5\ \mu\text{m}$ 有良好的透光性, 可与探测器的光谱响应范围匹配, 是一种优良的近红外耐高温光学材料. 蓝宝石单晶光纤既具有蓝宝石的优良性能又有光波导的特点, 是目前在高温环境下最适用的光波导材料之一^[7].

蓝宝石光纤黑体腔目前主要有两种制作方法, 一种是在蓝宝石单晶光纤的一端涂覆高发射率的感温介质陶瓷薄层, 并经高温烧结形成微型光纤感温腔, 这种感温介质必须能满足耐高温, 稳定性好, 且与蓝宝石单晶光纤基体结合牢固等一系列苛刻的要求. 另一种是以蓝宝石单晶光纤为基体, 在其一端溅射钽贵金属感温介质薄膜, 构成体积微小的感温黑体腔(热传感头). 为防止金属在高温下挥发, 在腔外壁一般再蒸镀一层 Al_2O_3 保护膜. 本文的光电高温计采用了前一种方法.

在蓝宝石光纤的一端涂覆高发射率的感温介质薄层并经高温烧结形成一微型的光感温腔(热传感头), 当热传感头深入到热源时光纤感温腔与周围环境迅速达到热平衡, 感温腔辐射的光信号经蓝宝石光纤传输.

2.2 温度测量光电放大器

温度测量光电放大器由耦合模块和低噪音光电探测器组成. 为了提高耦合效率, 减少衰减, 使光信号最大限度的远距离传输, 设计了耦合模块. 辐射光信号由透镜变成平行光后经窄带滤光片通过另一透镜汇聚到传导光纤中, 再传至光电探测器件. 窄带干涉滤光片虽然降低了信噪比, 但提高了测温精度, 按照要求选择了中心波长为 820 nm 窄带截止型干涉滤光片. 把计量部门检定过的钨铼热电偶和蓝宝石温度传感器放在由氧乙炔焰加热的均匀恒温金属块中, 同时测两者的温度, 得到蓝宝石温度传感器被测温度值与钨铼热电偶测得温度值一致, 测量值的相对误差小于 2%.

光电探测器选用硅 PIN 光电二极管与一个以 FET 为前端的宽带低噪音放大器混合集成的光电接收组件. 这种器件是一个包含小面积, 小电容的光电二极管与高输入阻抗的场效应管前置放大器的组合体. 其中所有引线长度及杂散电容都做得非常小, 由于电容小, 输入阻抗高, 可以大大降低热噪音, 这种组件还具有供电电压低, 工作十分稳定, 使用方便的特点^[8-9]. 光电探测器将光信号转变为电信号, 由数据采集部分采集, 经专用测温软件处理得出测点的温度/时间曲线.

3 温度测试实验

实验测量温度数据如表 1.

表 1 实验测量温度

Table 1 Temperature measurement results

Real temperature/ K	Measuring temperature/ K	Real temperature/ K	Measuring temperature/ K
1 710	1 711	1 692	1 693
1 692	1 693	1 669	1 670
1 698	1 697	1 688	1 687
1 676	1 675	1 661	1 660
1 700	1 700	1 699	1 698
1 689	1 688	1 694	1 695
1 691	1 690	1 675	1 676
1 713	1 712	1 700	1 700
1 698	1 699	1 680	1 681
1 687	1 686	1 690	1 691

4 结论

蓝宝石光纤黑体腔高温计结构简单、操作方便、灵敏度高、响应速度快, 适合于恶劣环境下高温的测量; 采用在蓝宝石单晶光纤的一端高温烧结高发射率的感温介质陶瓷薄层, 形成微型光纤感温腔, 能满足耐高温、稳定性好且与蓝宝石单晶光纤基体结合牢固等一系列苛刻的要求; 解决了蓝宝石光纤黑体腔传感器工程应用中的标定、光纤传输等关键技术, 利用此高温计已成功地测得连铸炉中的中间包钢水的温度, 为恶劣环境下高温的测试研究提供了一种可靠的方法.

参考文献

- [1] YE Lin-hua, SHEN Zhong-ping, ZHAO Wei-zhong, *et al.* Sapphire optical fiber thermometer based on fluorescence decay survey[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(8): 773-776.
叶林华, 沈忠平, 赵渭忠, 等. 基于荧光衰减测量的蓝宝石光纤温度计[J]. *光子学报*, 2002, **13**(8): 773-776.
- [2] SUN W M, ZHANG J Z, YU L. Measurement of decay time based on FFT[J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, **36**(4): 323-326.
- [3] CASTRELLON-URIBE J, PAEZ G, STROJNNIK M. Radiometric analysis of a fiber optic temperature sensor[C]. *SPIE*, 2002, **4486**: 164-169.
- [4] SUN T, GRATAN K T V, SUN W M. Fluorescence based on optical fiber fire alarm system[C]. *Proceeding OFS2002*, Hilton Portland, USA, 2002: 471-474.
- [5] WADE S A, COLLIN S F, BAXTER G W. Effect of strain on temperature measurements using the fluorescence intensity ratio technique (with Nd³⁺ - and Yb³⁺ - doped silica fibers) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, **72**(8): 3180-3185.
- [6] SIDIROGIOU F, WADE S A, DRAGOMIR N M, *et al.* Effects of high-temperature heat treatment on Nd³⁺ - doped optical fibers for use in fluorescence intensity ratio based temperature sensing[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, **74**(7): 3524-3530.
- [7] WADE S A, COLLIN S F, BAXTER G W. Fluorescence intensity ratio technique for optical fiber point temperature sensing[J]. *J of Appl Phys*, 2003, **94**(8): 4743-4756.
- [8] WU Jin-ling. Fluorescence fiber temperature sensor based on wavelet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1149-1152.
武金玲. 基于小波变换技术的荧光光纤温度传感器研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1149-1152.
- [9] LI Wei-liang. Frequency parameters for an optical fiber sensor system based on frequency domain raman reflectometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1): 86-90.
李伟良. 光频域喇曼反射光纤温度传感器的频域参量设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1): 86-90.

Sapphire Optic Fiber Thermometer for High Temperature in Tundish

WANG Dong-sheng, PAN Wei-wei

(Hebei Engineering University, Handan, Hebei 056001, China)

Abstract: The sapphire optic fiber thermometer for high temperature is described. The sapphire optic fiber is suitable for high temperature measurement because of its wonderful high temperature physical and chemical performance, which can be used for radiation optic fiber temperature sensors. A sapphire fiber thermal probe with Cr^{3+} ion-doped end is grown by using the laser heated pedestal growth method. A laser is used to heat a small pedestal, so that fluorescence-temperature-responding materials like a small ruby crystal optic-fiber will grow on the top of the sapphire optic-fiber, which can be made into a compact-structure, high-temperature and stable-function sensor head. Though the fluorescence life measurement, the corresponding temperature can be measured. According to the surface temperature, the inner temperature can be obtained by the temperature field. It can be used in measuring the steel fluid of the tundish in continuous cast steel machines. Experimental system of the thermometer and the preliminary experimental result are presented. The experiment results shows that it can realize non-touched measurement and has high precision.

Key words: Application optics; Fluorescence thermometer; Sapphire optic fiber; Tundish



WANG Dong-sheng was born in 1981. He is a lecturer at Hebei Engineering University and studying his Ph. D. degree at Yanshan University. His research interests focus on photoelectric measurement.