

光纤传输在非接触测温中的一种应用

殷际英, 颜 炜

(北方工业大学机电工程学院, 北京 100041)

摘 要:针对现有测温仪无法适应高温与真空工作环境的问题,对光纤传导辐射能进行了定性和定量分析,建立了光纤传导测温模型,导出了选型参数计算式及误差纠正式,并给出了实验实例,证明了该方法可行性,实现了对已有红外高温计的功能延伸。

关键词:快速热处理;红外测温仪;光纤

中图分类号:TH811 **文献标识码:**A

A New Application of Optical Fiber Communication in the Noncontact Temperature Measurement

YIN Ji-ying, YAN Wei

(College of Mechano-electronic Engineering, North China Univ. of Tech., Beijing, 100041, China)

Abstract: In allusion to the difficulty to use the existent pyrometer in the high temperature and vacuum, this paper present a qualitative analysis and a quantitative analysis for the radiation energy transfer in the optical fiber. And based on the results of the above analyses, the modal and the formula of total coefficient about energy transfer by optical fiber and temperature measurement are also established. Finally, the designing and calculating example of this radiator is given and the feasibility of this measure is proved. The function of the existent pyrometer is extended.

Key words: rapid thermal processing (RTP); infrared pyrometer; optical fiber

1 引 言

光纤在非接触测温系统中有两种使用形式:一种是用作被测体热辐射能的传输管道;另一种是利用光纤的温度敏感性,直接用作温度的传感器。其中,第一种形式可使测温探头与仪表分离,从而增强了仪器仪表规避狭小空间和高温、电磁、腐蚀气氛等恶劣环境的能力。通过引入光纤传输辐射使现有红外测温仪具有对上述恶劣环境的适应性,在技术和经济方面都具有重要应用价值。在 RTP 系统中对晶片表面温度状况进行及时探测就适于采用这种非接触测温形式。本文将探讨一种将单色辐射高温测温仪与光纤传输相结合,在快速热处理(RTP)系统中对高温晶片实行非接触式测温的方法。

2 单色辐射测温原理和光纤传输系统的选型计算

2.1 单色辐射测温原理

按热辐射理论,在给定温度下,黑体辐射力 E_b

(W/m^2) 和黑体光谱辐射力 $E_{b\lambda}$ (W/m^3) 分别由辐射四次方公式^[1]和普朗克公式^[1]来描述,即:

$$E_b = \sigma T^4 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (1)$$

式中, σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$; T 为黑体热力学温度, K; C_0 为黑体辐射系数,其值为 $5.67 W/(m^2 \cdot K^4)$

和

$$E_{b\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} \quad (2)$$

式中, c_1 为第一辐射常量,其值为 $3.7419 \times 10^{-16} W \cdot m^2$; c_2 为第二辐射常量,其值为 $1.4388 \times 10^{-2} m \cdot K$ 。

其他物体的热辐射力 E 和光谱辐射力 E_λ 为:

作者简介:殷际英(1950-),男,工学硕士,教授,主要研究方向是固体力学和传热学的工程应用,软件开发,机器人系统及其虚拟技术。E-mail: yinshi6917en@sina.com; ak926@163.com

收稿日期:2007-08-28; 修订日期:2007-10-09

$$E = \varepsilon E_b \tag{3}$$

和

$$E_\lambda = \varepsilon_\lambda E_{b\lambda} \tag{4}$$

在式(3)、(4)中, ε 和 ε_λ 分别为发射率和光谱发射率,对于一般工程材料而言, ε 为固定值。单色辐射测温原理基于黑体辐射的普朗克定律,测温仪测出物体某个波长附近的辐射力,换算为该波长光谱辐射力 E_λ ,代入普朗克公式,就可算出物体温度。

2.2 光纤传输系统的选型计算

光纤传输测温系统的一个性能指标是尽量减小目标聚焦到光缆端面的辐射能损耗。图1给出了光纤传输系统的探测端设计结构。

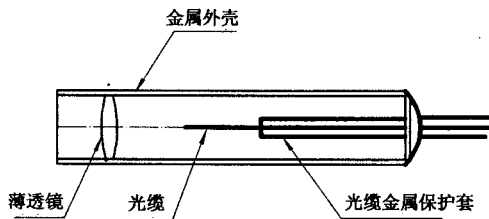


图1 光纤传输系统的前端探测结构

如图1所示,光纤束前端位于凸透镜的1倍焦距和2倍焦距之间。实际上,由于光缆直径为毫米量级,凸透镜直径一般为十毫米量级,凸透镜与被测表面的轴向距离为百毫米量级,则光纤束前端可视作在凸透镜的焦点上,光纤束后端端面则直接作为被测温面由单色辐射测温仪采集温度值,如图2所示。



图2 光纤传输系统的后端探测结构

光纤传输系统可以考虑选择外径 $R = 0.6\text{mm}$,内径 $r = 0.57\text{mm}$ 的多模光纤(单纤或多纤集束),对 $1.6\mu\text{m}$ 中短波长高温红外光传导在 10m 内近于零损耗,其数值孔径约为 0.22 ,最大入射角 $\theta_{\max} = 12.7^\circ$,纤芯直径与外径比值大于 95% ,以保证光的接收面积,提高接收光的辐射能量,光纤的光波透射率为 τ 。

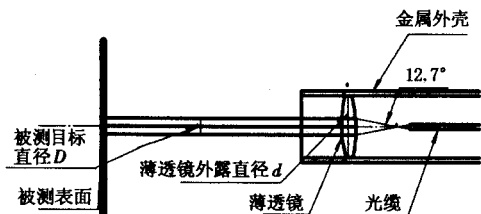


图3 凸透镜、焦距和被测目标间的几何关系

在选择凸透镜时,需要满足:

$$\frac{d}{2} \geq f \tan \theta_{\max} \tag{5}$$

式中, d 为凸透镜外露直径, mm ; f 为凸透镜焦距, mm ; θ_{\max} 为最大入射角,对于所选多模光纤 $\theta_{\max} = 12.7^\circ$ 。

图3中,被测目标直径可由下式计算,即:

$$D = 2f \cdot \tan 12.7^\circ \tag{6}$$

根据薄透镜成像牛顿公式^[2],可计算出被测量物体从凸透镜物方焦点算起的物距 u ,即:

$$uu' = f^2 \tag{7}$$

式中, u' 是从凸透镜像方焦点算起的像距, mm 。

光纤传输系统设计需要综合考虑上述条件。为补偿由于辐射能的实际损耗所产生的误差,由能量相等条件,可得以下修正式,即:

$$E_\lambda \pi (D/2)^2 \tau \frac{\pi r^2}{\pi R^2} = E_{\text{out}} \pi R^2 \tag{8}$$

式中, E_{out} 为测温仪接收到的经光纤传输的光谱辐射力, W/m^3 。

整理式(6)、式(8),得:

$$E_\lambda / E_{\text{out}} = \frac{R^4}{\tau r^2 \tan^2 12.7^\circ} \tag{9}$$

由式(9)可见,通过选择 f 与 τ ,可使 $E_\lambda = E_{\text{out}}$ 。

3 光纤传输非接触测温系统基本结构

3.1 光纤末端多点测温采集结构

RTP系统为检测晶片表面温度分布的均匀性,需要实现多点快速顺序测温,通过对被测表面设置多个探测头可以实现单一测温仪的快速空间多点分时采样,图4给出多路光纤末端测温面板示意结构图。

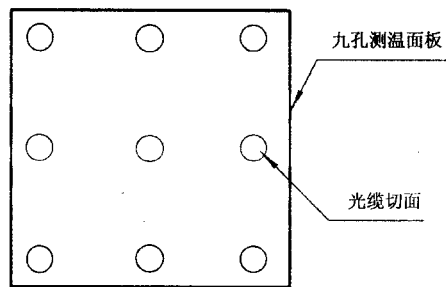


图4 多点测温采集端口面板

3.2 测量误差及补偿方法

由于光缆传输入射角等原因,使得部分需测量的辐射能无法被测温仪接收,吸收比 c 是常数 ($0 < c < 1$),定义为:

$$c = \frac{E_{\text{测}}}{E_{\text{实}}} = \frac{e^{c_2/\lambda T_{\text{实}}} - 1}{e^{c_2/\lambda T_{\text{测}}} - 1} \approx \frac{e^{c_2/\lambda T_{\text{实}}}}{e^{c_2/\lambda T_{\text{测}}}} \leq 1 \tag{10}$$

为补偿此常量误差,可测量一系列 $T_{\text{实}}$ 与 $T_{\text{测}}$,再由

$$\ln c = \frac{c_2}{\lambda T_{\text{实}}} - \frac{c_2}{\lambda T_{\text{测}}} \tag{11}$$

求得 c 的均值,并将物体发射率校正为:

$$\varepsilon = c\varepsilon \quad (12)$$

4 应用实例——在 RTP 系统中测量 8in 晶片表面的温度分布

MB18 红外测温仪透镜镜头直径 10mm, 焦距 190~420mm, 特征波长 1.6 μ m, 测温范围 350~1800 $^{\circ}$ C, 发射率可调, 有一个 RS485 输出端, 经转换可向 PC 机的 RS232 和 USB 接口输出数据, 工作环境温度为 -10~70 $^{\circ}$ C, 给定的温度探测距离 D 为 190~420mm。该测温仪在探测距离 $D = 190$ mm 时, 可探测目标的最小直径 $S = 0.5$ mm; 在 $D = 420$ mm 时, 可探测目标的最小直径 $S = 1.3$ mm。而 RTP 系统工作时, 距晶片表面几毫米处的辐射温度高达 800 $^{\circ}$ C 左右, 显然, MB18 探测物距过小, 无法直接探测温度, 因此决定采取结合光纤传输系统的方案, 进行间接多点测温。选定的 8in 晶片上测温点分布如图 5 所示, 系统中的光纤数目即测温点数。图 6 给出了 RTP 的非接触测温系统原理简图。

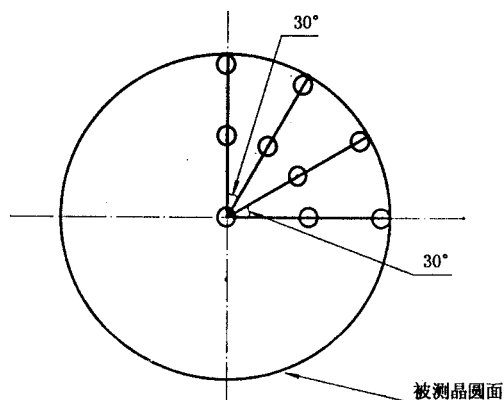


图 5 8in 晶片上选定的测温点分布图

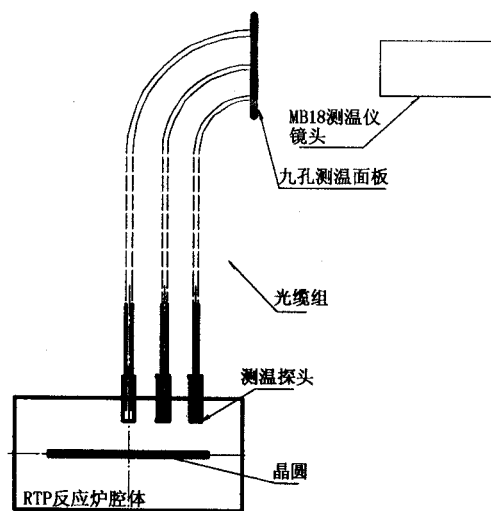


图 6 RTP 的非接触测温系统原理简图

在开放式实验腔体中, 选用两个 MB18 测温仪, 晶片发射率共同设置为 $\varepsilon = 0.90$ 。其中一号测温仪直接对准实验腔体上开口小孔测量温度得 $T_{\text{实}}$, 二号

测温仪通过光纤传输方法以测温探头对准同一点测量温度得 $T_{\text{测}}$, 取四组 $T_{\text{实}}$ 与 $T_{\text{测}}$ 数据, 由式(11)计算得 4 个 c 的值, 结果如表 1 所示。

表 1 由四组 $T_{\text{实}}$ 与 $T_{\text{测}}$ 数据计算的 c 值

$T_{\text{实}}/K$	$T_{\text{测}}/K$	c
1474	1457	0.931
1310	1295	0.924
729	725	0.933
878	872	0.927

取 c 的代数平均数 0.929, 由式(12)校正二号测温仪发射率后, 得到四组 $T_{\text{实}}$ 与 $T_{\text{测}}$, 结果如表 2 所示。

表 2 当 $c = 0.929$ 时计算得到的四组 $T_{\text{实}}$ 与 $T_{\text{测}}$

$T_{\text{实}}/K$	$T_{\text{测}}/K$
1532	1528
709	706
925	919
1430	1426

可见, 校正发射率后, 光纤传输的测温系统可以实现较高精度的测量。

5 结论

采用光纤传输非接触测温中的辐射能, 具有适应狭小空间和恶劣环境下测温需求的特点, 起到了保护测温仪和保证工作环境不受干扰的作用, 只要经过初始化调整, 适合用于测温仪机体无法适应的恶劣环境下单色辐射测温。

参考文献:

- [1] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 叶玉堂, 饶建珍, 肖峻. 光学教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] 袁国良. 光纤通信原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [4] 田理达, 毕纯晖, 梁彬. 红外光纤式辐射测温技术在发电设备中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2003(2): 57-59.
- [5] Khan M A, Allem C, Eagar T W. Noncontact temperature measurement: Interpolation techniques [J]. Rev. Sci. Instrum, 1994, 62(2): 392-402.
- [6] 王立伟. 手持式红外测温仪检定中的误差及分析[J]. 铁道技术监督, 2002(10): 30.
- [7] Eyal Dassau, Benyamin Grosman, Daniel R Lewin. Modeling and temperature control of rapid thermal processing [J]. Computers and Chemical Engineering, 2006, 30: 686-697.