

# 多波长辐射测温仪及其应用\*

戴景民 杨茂华 褚载祥

(哈尔滨工业大学精密仪器系, 黑龙江, 哈尔滨, 150001)

**摘要** 介绍了多波长辐射温度计的研制现状, 理论和应用研究以及应用前景.

**关键词** 辐射测温, 多波长辐射温度计, 发射率.

## 引言

近年来由于计算机技术, 电子元件和光电器件制造技术发展, 辐射温度计的测量精度和稳定性有了较大的提高, 并在很多领域得到了广泛应用.

目前仪器测得的只是物体视在(假定)温度(包括亮温, 色温或辐射温度等). 真温获得还须依靠物体材料发射率信息, 而物体材料发射率不仅取决于组份, 表面状态, 还取决于它的温度和波长等诸多因素, 而且随表面状态变化(如氧化、剥离、生锈等)而变化, 特别在高温和甚高温情况, 这种变化更剧烈, 因此用辐射测温法测量真温成了一大难题.

鉴于此, 国内外进行了大量的研究工作, 归纳起来有三大类: (1)用辅助技术测量物体发射率, 然后对测得的视在温度进行修正<sup>[1]</sup>. 该方法古老、简便, 被广泛采用; (2)尽可能减小目标表面发射率对真温测量影响<sup>[2]</sup>. 如采用半球镀金反射镜式辐射温度计或在试样上钻孔等; 半球镀金反射镜式辐射温度计适合大平面中低温物体, 不适宜温度太高及粉尘场合, 水汽影响较大. 而钻孔很多情况下是不允许的. (3)多波长辐射测温法. 它是利用目标的多光谱辐射测量信息, 经过数据处理得到目标真温和材料光谱发射率. 该方法适应性强, 因而近年来得到了长足的发展.

## 1 多波长辐射测温理论

考虑多波长高温计有  $n$  个通道, 其中第  $i$  个通道的输出信号  $S_i$  可表示为

$$S_i = K_i \cdot \epsilon(\lambda, T) \cdot C_1 \cdot \lambda_i^{-5} (\exp(C_2/\lambda_i T) - 1)^{-1}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式(1)中  $K_i$  为该通道的几何因子, 它与该波长下探测器的光谱响应率、光学元件透过率及几何因素有关, 可以通过定标得到;  $\epsilon(\lambda, T)$  为温度  $T$  的目标光谱发射率;  $C_1$ 、 $C_2$  分别为第一、

\* 国家自然科学基金资助项目

本文 1994 年 10 月 5 日收到, 修改稿 1995 年 4 月 27 日收到

第二辐射常数;  $\lambda_i$  为该通道的有效波长;  $T$  为目标的温度.

为了处理方便,可改用维恩定律来代替普朗克定律,则式(1)改为:

$$S_i = K_i \cdot \epsilon(\lambda_i, T) \cdot C_1 \cdot \lambda_i^{-5} \cdot \exp(-C_2/\lambda_i T) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

这样,整个多波长高温计共有  $n$  个方程,而未知数有  $\epsilon(\lambda_i, T)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 和  $T$  共  $(n+1)$  个,无法求解,因此,必须借助于另一个假定方程.人们通常选择  $\epsilon(\lambda, T)$  和  $\lambda$  这一函数假设.其中著名的假设有:

$$\ln \epsilon(\lambda, T) = a + b\lambda, \quad (3)$$

$$\ln \epsilon(\lambda, T) = \sum_{i=0}^m a_i \cdot \lambda^i, \quad (m \leq n-2) \quad (4)$$

$$\epsilon(\lambda, T) = a_0 + a_1 \lambda, \quad (5)$$

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{1}{2} [1 + \sin(a_0 + a_1 \lambda)], \quad (6)$$

$$\epsilon(\lambda, T) = \exp[-(a_0 + a_1 \lambda)^2], \quad (7)$$

把式(3)~(7)中任何一个代入式(2),可得到  $n$  个新的方程,而未知数的个数则少于或等于  $n$ ,这样就可用拟合或解方程办法求得温度  $T$  和光谱发射率.

假设的形式不同,求解的方法亦不同,如对于式(3)、(4)、(7)假设,可采用线性拟合方法,而式(5)、(6)则要用非线性拟合方法求解.

要说明的是式(3)~(7),假设不是唯一的,只是从处理方便角度提出的,它们对每种材料的适用性,还需要理论及进一步的实验验证.

1981年 Coates<sup>[3]</sup>发表了有关多波长理论的研究成果,应用式(4)的一种极限情况(即  $m = n-2$ ),推导出拟合温度与真温之差与波长、波数及波长间隔的关系式.

1984年 Hunter<sup>[4]</sup>和 1986年 Nordine<sup>[5]</sup>分别发表了提高多波长拟合温度精度的论文. Coates<sup>[6,7]</sup>在 1988年讨论了式(3)、(4)假设下多波长高温计数据拟合方法和精度问题. 1991年 Mansoor<sup>[8]</sup>等总结了多波长高温计数据拟合法(线性和非线性),并提出了应用黑体炉和各种光谱分布衰减片来验证多波长理论的实验方法. 1992年 Gather<sup>[9,10]</sup>应用 Monte-Corlo 法估计了线性拟合和非线性拟合的精度. Pei Y 结合棱镜分光式多波长高温计对多波长测温法的测量精度作了计算.

## 2 多波长高温计研究状况

1954年 Pyatt<sup>[11]</sup>首先制成三波长辐射温度计. 1964年 Reynolds<sup>[12]</sup>正式提出多波长测温的概念和理论. 到 70年代末兴起了多波长测温技术研究热. 1979年 Cashdolar<sup>[13]</sup>亦研制成三波长高温计,在 0.8、0.9 及 1.0  $\mu\text{m}$  三种工作波长下测量火焰及爆炸粉尘的温度,测量上限为 2000K. 同时还可用更换滤光片方法形成 4 波长乃至 6 波长高温计. 同年 Svet<sup>[14]</sup>等也研制成功了 4 波长高温计,用以测量物体表面的真温,测量范围为 300~3000K. 与此同时, Lyzenga<sup>[15]</sup>制成了 6 波长高温计,采用硅光电二极管作为 0.48~0.8  $\mu\text{m}$  波长范围内的

检测元件,用以测量高压及冲击波后的物体真温,测量范围为 4000~8000K,精度为 2%。1980 年 Gardner 及 Jones 等<sup>[16,17]</sup>研制成功 6 波长高温计,工作波长为 0.75~1.6 $\mu\text{m}$ ,测温范围为 1000~16000K,精度为 1%,并与比色高温计作了比较。1982 年欧共体 Babelot 及美国 Hoch 等人<sup>[18]</sup>继续研制多波长高温计,主要用于高温耐火材料热物性的快速动态测量,在 5000K 时分辨率为 5K,并拟向 10000K 方向继续研究。1986 年欧共体及美国联合课题组的 Hiernaut<sup>[19]</sup>等人研制成功亚毫米级的 6 波长高温计,用于 2000~5000K 温区内真温测量;其测量精度为 0.5%,发射率测量精度为 1~5%,1991 年美国 Cezairliyan 等人<sup>[20]</sup>制成了 6 波长高温计,用于铌、钨、钼等金属凝固点辐射温度的测量。同年,作者与 Ruffino<sup>[21]</sup>合作,研制成了棱镜分光式 35 波长高温计,并用于烧蚀材料的真温测量。

### 3 多波长辐射温度计典型方案

在众多的多波长高温计中,本文介绍 3 种有代表性的方案及典型仪器。

#### 3.1 滤光片阵列分光式多波长高温计

Gardner<sup>[16]</sup>等人于 1980 年研制了滤光片阵列分光式多波长高温计,其结构框图如图 1 所示。

仪器设计的测试距离为 750mm,目标直径为 3mm,目标经主物镜  $L_1$  成像在直径为 1mm 的视场光阑 FS 上,经  $L_2$  透镜产生平行光线,再通过直径为 9mm 的孔径光阑 LA 投射到滤光片列  $F_1$  至  $F_6$  上,光束至滤光片入射角为  $10^\circ$ ,6 个相同的透镜  $L_3$  把从滤光片透过的光束分别聚焦在 6 个探测器  $D_1 \sim D_6$  上。其中 3 个为硅探测器(型号 SD-076-11-11-011),另 3 个为锗探测器(型号 Rofin 746)。工作波长分别为 0.75、0.89、1.0、1.27、1.55 和 1.7 $\mu\text{m}$ ,带宽为 0.07~0.09  $\mu\text{m}$ 。

探测器工作方式都是光伏式,经前置放大后经 V/F 转换送入各自的计数器转变成数字量,最后送入微处理器,微处理器可以通过串行接口与微机通讯。

#### 3.2 光导纤维束分光式多波长高温计

图 2 为 Hiernaut<sup>[19]</sup>等人研制的 6 波长高温计的光学和电路部分示意图。

图 2(a)中  $L_1$  为主物镜,FS<sub>1</sub> 为第一视场光阑( $\phi 1.5\text{mm}$ ); $L_2$  为中继物镜;AS 为有效孔径光阑;FS<sub>2</sub> 为主视场光阑( $\phi 1\text{mm}$ ), $L_3$  为场镜;FB 为分光用光导纤维束; $L_4$  为准直物镜; $F$  为干涉滤光片(6 个); $\square$  为光电探测器(6 个); $M_1$ 、 $M_2$  为平面反射镜,W 为衰减片转轮。

该装置的探测器为 EG&G 公司的硅光电二极管(HUV4000B),工作波长分别为 0.5、0.6、0.68、0.8、0.96 和 1.04 $\mu\text{m}$ 。

#### 3.3 棱镜分光式多波长高温计

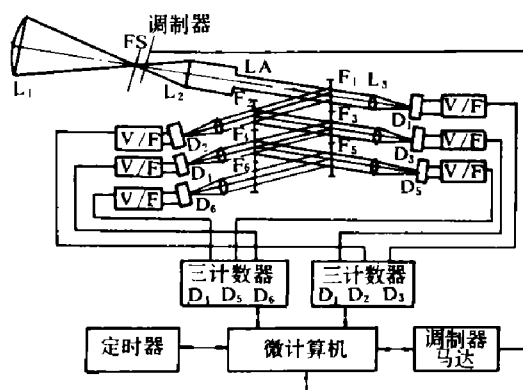
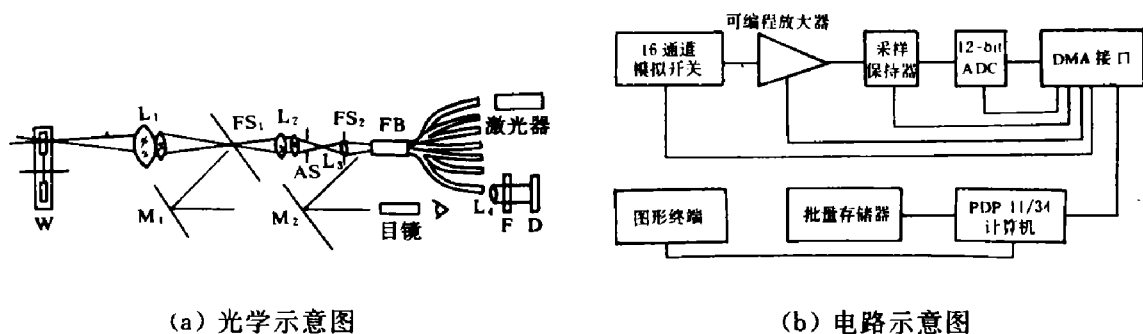


图 1 高温计结构框图

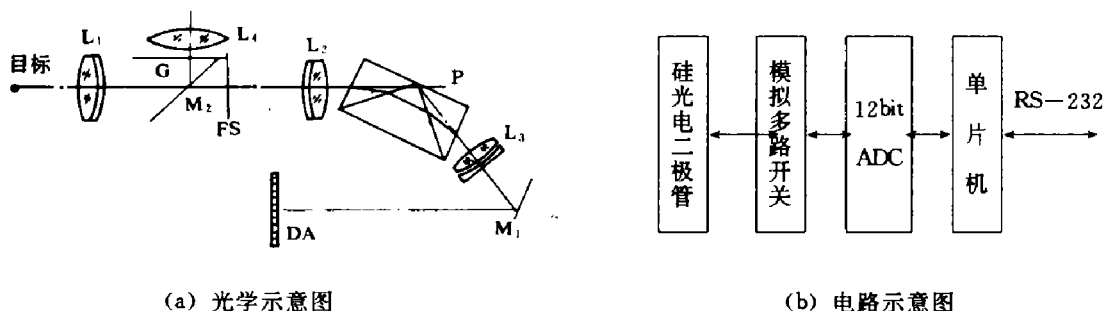
Fig. 1 Block diagram of the pyrometer



(a) 光学示意图 (b) 电路示意图  
 图 2 高温计的光学和电路示意图  
 Fig. 2 Optical (a) and electronic (b) block diagrams of the pyrometer

该装置是作者与 Ruffino<sup>[22]</sup>于 1991 年合作研制成功的,其光学和电路示意图如图 3 所示.

图 3(a)中  $L_1$  为主物镜,FS 为视场光栏, $L_2$  为准直物镜,P 为组合色散棱镜, $L_3$  为暗箱物镜, $M_1$  为平面反射镜, $M_2$  为可移动平面反射镜,DA 为光电探测器阵列,G 为分划板, $L_4$  为目镜.



(a) 光学示意图 (b) 电路示意图  
 图 3 高温计光学和电路示意图  
 Fig. 3 Optical (a) and electronic (b) block diagrams of the pyrometer

该仪器有以下特点:(1) 能量损耗小,易于向低温发展;(2) 取消了传统仪器中的干涉滤光片,消除了因干涉滤光片老化,随温度、湿度漂移造成的不稳定性;(3) 结构简单,易于产品化. 目前该仪器已小批量生产,且发展了系列仪表.

Coppa 和作者<sup>[22]</sup>应用该仪器测量了脉冲加热下的仪器动态特性.

#### 4 多波长高温计应用

1986 年 Hiernaut 等人<sup>[23]</sup>应用他们研制的 6 波长高温计对钨、钽、钼的熔点温度和光谱发射率进行了测量. 实验中,应用脉冲加热法在瞬间把金属试样加热至熔点,采用多波长高温计及相配的快速数据采集系统进行测量和数据采集. 应用式(3)假设,处理结果为:钨熔点为  $3685 \pm 10K$ ,钽熔点为  $3290 \pm 10K$ ,钼熔点为  $2895 \pm 8K$ ,发射率测量结果与文献数据吻合较好. 1989 年 Hiernaut<sup>[24]</sup>等人发表了进一步研究结果,他们测量了铅、铋、锆、钨、铪、铌、钽、

钨、钒等 9 种金属的熔点,测量精度优于 0.5%。

1981 年 Gardner<sup>[16]</sup>等人应用他们研制的 6 波长高温计测量了一系列金属表面的真温,使用式(5)假设,采用非线性拟合技术拟合温度. 所得结果与最短两个波长构成的比色温度计的测量结果做了比较,他的结论为:如假设形式接近实际情况,多波长高温计所测温度系统误差小于 1%。此假设适用于氧化及未氧化的钢、铜、铝及氧化不锈钢,氧化铬镍铁合金表面. 而不适用于铸铁、铂 40%铯及未氧化不锈钢和铬镍铁表面. 多波长高温计在测量钢、铝和铜表面时明显优于比色温度计。

1993 年作者应用棱镜分光式多波长高温计测量地面模拟烧蚀系统中烧蚀材料温度. 在严重烧蚀、剥离和烟雾及粒子影响下,温度测量精度优于 1%,发射率测量精度优于 5%。

## 5 结论与展望

多波长高温计是一种新的测温仪器,需要有一个发展与完善的过程. 特别在理论方面,它是采用假定的波长与发射率的函数关系,带有一定的盲目性,还需进一步研究各种材料发射率和波长之间函数曲线,找到一个适合所有材料或一类材料的函数模型,另外,对上面的理论还需要实验验证。

多波长高温计在辐射真温测量中已显示出很大潜力,在高温、甚高温、特别是瞬变高温对象的真温测量中,多波长高温计是很有前途的仪器。

**致谢** 作者在资料收集、方案比较过程中得到了意大利罗马大学 G. Ruffino 教授和 P. Coppa 博士的热心帮助和指教,在此表示衷心感谢。

## 参考文献

- 1 Kelsall D J. *Sci. Instrum.*, 1963, **40**:1~4
- 2 Brury M D, Derry K P, Land T. *J. Iron Steel Inst.*, 1951, **169**:245~250
- 3 Coates P B. *Metrologia*, 1981, **17**:103
- 4 Hunter G B. *Spectrometric Temperature Measurements of Thermal Radiators*, Ph. D. Thesis, MIT, Cambridge, 1984
- 5 Nordine P C. *High Temp. Sci.*, 1986, **21**:97
- 6 Coates P B. *High Temp-High Press.*, 1988, **20**:433~441
- 7 Coates P B. *High Temp-High Press.*, 1988, **20**:443~448
- 8 Mansoor A K, et al. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(2):403
- 9 Gathers G R. *Int. J. Thermophys.*, 1992, **13**(2):361
- 10 Gathers G R. *Int. J. Thermophys.*, 1992, **13**(3):539
- 11 Pyatt E C. *Br. J. Appl. Phys.*, 1954, **5**:264~268
- 12 Reynolds P M. *Br. J. Appl. Phys.*, 1964, **15**:579~589
- 13 Cashdollar K L. *Appl. Opt.*, 1979, **18**:2595~2597
- 14 Svet D Ya, et al. *High Temp.-High Press.*, 1979, **11**:117~118
- 15 Lyzenga G A, Ahrens T J. *Rev. Sci. Instrum.*, 1979, **50**:1421~1424
- 16 Gardner J L, Jones T P. *J. Phys. E.*, 1980, **13**:306~310
- 17 Gardner J L, Jones T P. *High Temp. High Press.*, 1981, **12**:459~466
- 18 Babelot J F, et al. *Temp. Its Meas. and Contr. in Sci. and Industry*, 1982, **5**:439
- 19 Hiernaut J P, et al. *High Temp. High Press.*, 1986, **18**:617

- 20 Cezairliyan A, *et al. Temp. ,Its Meas and Contr. in Sci. and Industry*, 1991, **6**:757
- 21 Ruffino G, *et al. Temp. ,Its Meas and Contr. in Sci. and Industry*, 1991, **6**:807
- 22 Coppa P, Dai J M, Ruffino G. *Int. J. Thermophys.* ,1993, **14**(3):599
- 23 Hiernaut J, *et al. High Temp. High Press.* ,1980, **12**:699
- 24 Hiernaut J, *et al. High Temp. High Press.* ,1989, **21**:139

## MULTI-WAVELENGTH PYROMETER AND ITS APPLICATIONS \*

Dai Jingmin Yang Maohua Chu Zaixiang

(*Precise Instruments Department, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang, 150001, China*)

**Abstract** The latest achievements and status in Multi-Wavelength Pyrometer (MWP) have been reviewed. Its applications are introduced, too.

**Key words** thermometry, multi-wavelength pyrometer, emissivity.

---

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China