文章编号：1000-5773(2009)02-0150-05

滤光片对瞬态光学高温计通道线性的影响*

王荣波，李泽仁

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳 621900）

摘要：滤光片是瞬态光学高温计系统中的一个重要器件，滤光片的技术参数对高温计的性能有重要影响。对窄带滤光片的通带半高宽、背景透过率和峰值透过率给通道线性带来的影响进行了分析和计算。结果表明，滤光片的通带半高宽、背景透过率和峰值透过率对通道的线性均有较大的影响。研究结果为研制高性能的瞬态光学高温计时选取合适的滤光片提供了依据。

关键词：滤光片；光学高温计；线性

中图分类号：O521.3；TB942 **文献标识码**：A

1 引 言

瞬态光学高温计是冲击波物理和爆轰物理研究中的重要测试设备，主要用于动载荷下瞬态高温的测量，如材料的冲击温度[1-6]、卸载温度、残余温度、炸药爆轰温度[7-8]、火药燃烧温度[9]等。此外，瞬态光学高温计在工业生产中也有广泛的应用[10-11]。它适用于工业生产流程中快速测量静止或运动物体的表面温度，如冶金、机械工业中的熔铁、内燃机缸内温度、热成型加工、热处理、玻璃品制造、纺织工业织物热定型、半导体单晶和多晶材料接制等方面的温度测量。

光学高温计测温原理是基于普朗克辐射理论，属于辐射亮度绝对定标测量，实验前需要用标准灯或标准光电高温计对其进行标定。由于光源温度范围的限制，目前高温计最高只能标定到 3 400 K。对于标定范围以外的温度点的测量，只能采用线性外推方法计算每个通道的光谱辐射亮度，进而给出辐射温度值。这就要求高温计中每个测试通道的线性度要高，否则外推方法将会带来很大的测量误差。对光学高温计线性影响较大的因素包括光电倍增管、前置放大器和滤光片。对于光电倍增管和前置放大器的线性人们考虑得比较多，而滤光片对线性的影响[12]是一个容易被忽略的问题。本研究通过对滤光片的通带半高宽、背景透过率和峰值透过率对光学高温计通道线性的影响进行分析和计算，给出了设计光学高温计时选择滤光片技术参数的一些原则。

2 多波长瞬态光学高温计的工作原理

多波长瞬态光学高温计是以普朗克黑体辐射理论为基础，将待测光源的辐亮度与标准光源的辐亮度进行比较，从而得到待测光源温度的一种测温系统。其单波长测试系统组成如图 1 所示。

光学高温计工作时，每个工作通道输出的电信号幅度 V_i 与该通道的光谱辐亮度 L_i 应具有良好的线性关系。计算温度时，首先计算出各个通道的光谱辐亮度，再利用最小二乘法将各通道辐亮度用普朗克公式拟合，就可得到待测光源的温度。

* **收稿日期**：2008-04-22；**修回日期**：2008-07-22

作者简介：王荣波(1976－)，男，学士，助理研究员，主要从事冲击波物理与爆轰物理实验中的光电测试技术研究. E-mail：wangrbo@tom.com

$$L_i(\lambda,T)=\frac{V_i}{k_i} \tag{1}$$

式中:k_i 为该通道的线性常数,通过标定得到。标定时,采用标准温度灯作为标准光源,对高温计进行单个温度点标定[8];或采用高温黑体炉作为光源,利用标准光电高温计作为标准器对高温计进行多个温度点标定[13]。由于光源温度范围的限制,目前高温计最高只能标定到 3 400 K,而工作波长在可见光范围内的光学高温计的设计最高测温点一般可达 10 000 K。对于标定范围以外的温度点测量,只能采用线性外推法计算每个通道的光谱辐射亮度,进而给出辐射温度值。这就要求高温计的每个测试通道具有良好的线性,否则外推法将会带来很大的测量误差。

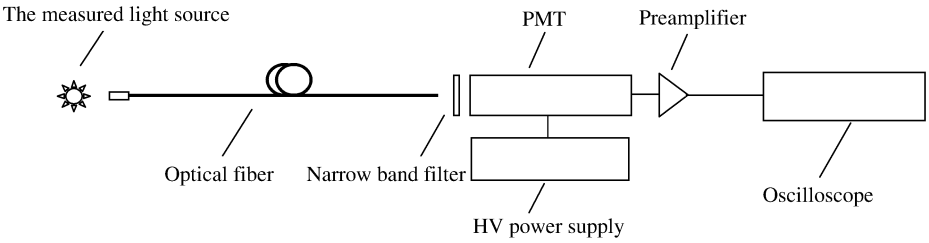


图 1　光学高温计单波长系统组成示意图

Fig. 1　Schematic diagram of single channel optic pyrometer system

3　滤光片参数对通道线性度的影响分析

3.1　光学高温计通道线性常数的推导

假设光源温度为 T,发射率为 1,某一光电通道的工作波长为 λ_0,光纤透过率为 $r(\lambda)$,光电倍增管阴极响应为 $\varphi(\lambda)$,干涉滤光片透过率为 $\phi(\lambda)$,滤光片底宽为 $\lambda_2-\lambda_1$,滤光片截止区为($\lambda_{\min}$,$\lambda_{\max}$),则该通道输出的电信号幅度 V_i 为

$$V_i=\left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda)\phi(\lambda)\varphi(\lambda)L(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda+\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_1} Ar(\lambda)\varphi(\lambda)L(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda+\int_{\lambda_2}^{\lambda_{\max}} Ar(\lambda)\varphi(\lambda)L(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda\right]S\,\Delta\Omega \tag{2}$$

式中:$L(\lambda,T)$为黑体单色辐射亮度,A 为滤光片背景透过率,S 为光纤横截面积,$\Delta\Omega$ 为光纤接收立体角。(2)式后两项积分为背景光对信号的贡献。由普朗克公式可得

$$L(\lambda,T)=\frac{C_1}{\pi\lambda^5}\left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)-1\right]^{-1} \tag{3}$$

式中:C_1 和 C_2 分别为第一与第二辐射常数,它们的数值是 $C_1=3.7418\times10^{-16}$ W·m^2, $C_2=1.4388\times10^{-2}$ m·K。滤光片透过率 $\phi(\lambda)$一般满足类高斯分布曲线,即

$$\phi(\lambda)=b\exp\left\{\frac{-2(\lambda-\lambda_0)^2}{[(\lambda_2-\lambda_1)/3]^2}\right\} \tag{4}$$

式中:b 为滤光片的峰值通过率。(4)式是通过分析拟合大量的滤光片透过率曲线得到的。对于窄带滤光片,其拟合度达 90%以上。标定 k_i 时,标准光源输入到该通道的光谱辐亮度为

$$L_i=\varepsilon_0 L(\lambda_0,T) \tag{5}$$

式中:ε_0 为标准光源的光谱发射率,对于黑体炉而言,其值非常接近 1。

用(2)式除以(5)式,并参照(1)式可得

$$k_i=\left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda)\phi(\lambda)\varphi(\lambda)L(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda+\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_1} Ar(\lambda)\varphi(\lambda)L(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda+\int_{\lambda_2}^{\lambda_{\max}} Ar(\lambda)\varphi(\lambda)L(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda\right]\frac{S\,\Delta\Omega}{\varepsilon_0 L(\lambda_0,T)} \tag{6}$$

由(6)式可知,高温计各通道的线性常数 k 是温度的函数,其值跟滤光片通带半高宽、峰值透过率和背景透过率有关。为了使每个通道达到最好的线性,需要选择最优的滤光片通带半高宽、峰值透过率和背景透过率。

3.2 滤光片通带半高宽对通道线性的影响

由于光学高温计所使用的滤光片通带一般很窄(<100 nm),为了讨论方便又不失一般性,本研究在计算时将 $r(\lambda)$、$\varphi(\lambda)$、$\Delta\Omega$ 和 ε_0 的数值均取为 1,本节计算时取 $b=1$。国产滤光片的背景透过率一般为 0.1%,因此本节计算时取 $A=0.1\%$。滤光片透过率 $\phi(\lambda)$一般满足高斯分布,由(4)式近似给出,其底宽 $\lambda_2-\lambda_1$ 与半高宽 H_w 有固定关系,因此若通道工作波长、滤光片半高宽给定,则 λ_1 和 λ_2 就确定了。

以工作波长为 500 nm 的通道为例,估算滤光片通带半高宽对通道线性的影响。该通道使用的光电倍增管的阴极材料一般为 S20,这种阴极材料的光谱响应范围为 380～850 nm。据此,滤光片的截止区选定为 350～900 nm。

在上述参数选定之后,利用(6)式就可以计算出通道线性常数 k 随温度变化的情况。图 2 是计算得到的、在给定不同滤光片通带半高宽时通道线性常数 k 随温度变化的曲线。计算的温度范围为 2 000～10 000 K。从图 2 可以看出:在给定不同滤光片通带半高宽时,通道线性常数 k 随温度有明显的变化,尤其在 2 000～2 800 K 范围内变化最为剧烈,而在 2 800～10 000 K 之间 k 值的变化较小。该结果表明,在标定高温计时标定温度点最好选定在 2 800 K 以上,对于工作波长在可见光范围内的通道,其测温范围最好设定在 2 800～10 000 K,这样由线性外推带来的测量误差最小。

根据上述讨论结果,在 2 800～10 000 K 温度范围内计算了通道线性常数 k 的极限变化率 dk(在该温度范围内 k 的最大值与最小值之差与 k 的平均值的比值)随滤光片通带半高宽变化的情况,如图 3 所示。由图 3 可知,k 的极限变化率 dk 随着滤光片通带半高宽的变化有明显的变化,并且存在一个最佳的通带半高宽值,在该值时 k 的变化率 dk 最小。对于波长 500 nm 通道的滤光片,在背景透过率取 0.1%、峰值透过率取 1 的情况下,通带半高宽取 50 nm 最佳。

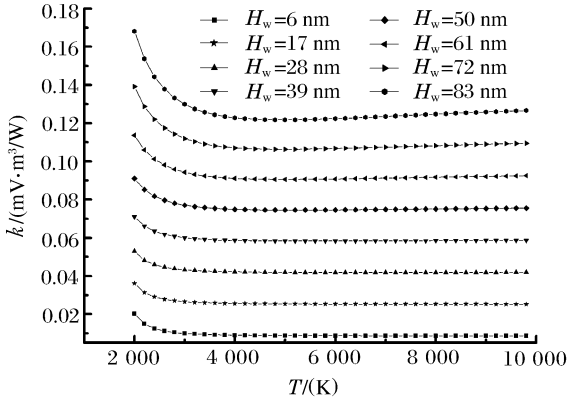


图 2 给定不同滤光片通带半高宽时通道线性常数 k 随温度变化的曲线

Fig. 2 The variation of channel linearity constant with temperature for given filter's bandpass half width

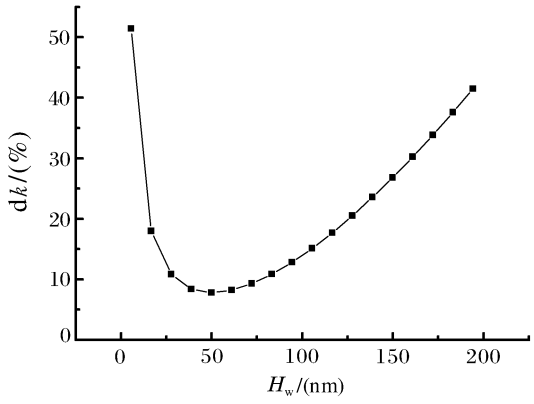


图 3 2 800～10 000 K 温度范围内 dk 随滤光片通带半高宽变化的关系

Fig. 3 The variation of dk with filter's bandpass half width in temperature range of 2 800～10 000 K

3.3 滤光片背景通过率对通道线性的影响

从图 3 可以看出,即使选取最佳的通带半高宽,在 2 800～10 000 K 温度范围内 500 nm 通道线性常数 k 的极限变化率 dk 仍然达到 7.8%,这样外推的误差仍然较大。这主要是背景透过率的影响所致。为了减小这种影响,需要降低滤光片的背景透过率。图 4 是利用(6)式计算得到的、在给定不同的背景透过率的情况下,500 nm 通道 k 值在 2 800～10 000 K 温度范围内的变化率 dk 随通带半高宽变化的曲

线。从图 4 中可以看出:滤光片背景透过率对通道线性有明显的影响,当通带半高宽较小时(< 50 nm),这种影响尤其明显;背景透过率越小,通道的线性越好;背景透过率取不同值时,最佳的通带半高宽也不同,并且背景通过率越小,最佳的通带半高宽越小,通道的线性也越好。当背景透过率取 0.01%,最佳通带半高宽为 17 nm,此时通道 k 值的极限变化率 dk 为 1.2%。因此,应尽量选用背景透过率低的滤光片。

3.4　滤光片峰值通过率对通道线性的影响

由(4)式和(6)式可知滤光片峰值通过率对通道线性也有影响。图 5 是计算得到的当背景透过率取 0.01%,峰值透过率从 0.1～1.0 取值时,500 nm 通道线性变化率 dk 随通带半高宽变化的曲线。从图 5 可以看出:峰值透过率对通道线性的影响明显;在给定背景透过率和通带半高宽的情况下,峰值通过率越大,通道线性越好;峰值通过率不同,最佳的通带半高宽也不同,并且峰值通过率越高,最佳的通带半高宽越小,通道的线性也越好,在峰值透过率为 60%以上时,这种趋势减小。因此,应尽量选用峰值透过率>60%的滤光片。

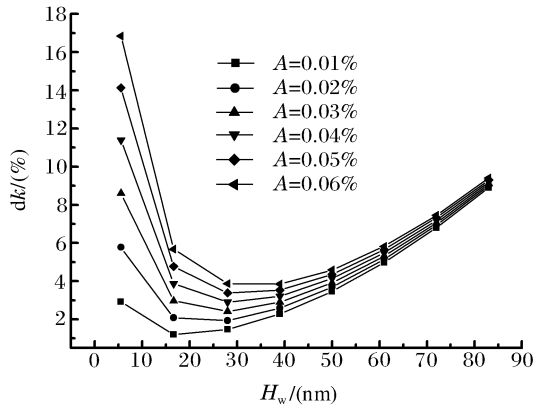


图 4　给定背景透过率时通道线性变化率 dk 随通带半高宽变化的曲线

Fig. 4　The variation of dk with filter's bandpass half width for given background transmittance

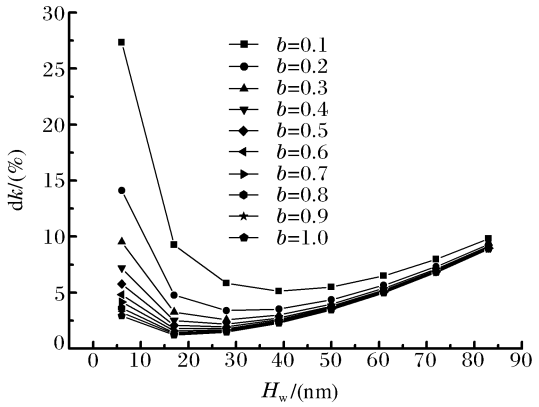


图 5　给定峰值通过率时通道线性变化率 dk 随通带半高宽变化的曲线

Fig. 5　The variation of dk with filter's bandpass half width for given peak transmittance

4　结　论

通过分析和计算滤光片通带半高宽、峰值透过率和背景透过率对通道线性的影响,可以得出如下结论:

(1) 滤光片通带半高宽对通道线性常数有较大的影响,尤其在 2 000～2 800 K 的温度范围内影响最大,而在 2 800～10 000 K 之间对通道线性常数的影响相对较小。在标定高温计时,标定温度点最好选定在 2 800 K 以上,工作波长在可见光范围内的通道的测温范围最好设定在 2 800～10 000 K,这样由线性外推带来的测量误差最小。

(2) 存在一个最佳的通带半高宽值,在该值时通道线性最优。因此在设计高温计时应先通过计算找出该通带半高宽最佳值。

(3) 滤光片背景透过率对通道线性有影响。在考虑成本的情况下,应尽量选用低背景透过率的滤光片。

(4) 滤光片峰值通过率对通道线性也有影响。在考虑成本的情况下,应尽量选用峰值透过率高的滤光片。

(5) 由于滤光片的背景透过率和峰值透过率是由生产厂家的技术水平决定的,选取滤光片时,应先根据厂家的生产能力确定背景透过率和峰值通过率,在此基础上通过计算确定滤光片的通带半高宽。

References:

[1] Tan H. Introduction to Experimental Shock-Wave Physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 67-77. (in Chinese)
谭 华. 实验冲击波物理导引 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 67-77.

[2] Veeser L R, Clark D A, Holtkamp D B, et al. Subcritical Plutonium Experiment at the Nevada Test Site [R]. California: University of California, 1997/1998: 94-101.

[3] Fulton R D, Wilke M D, King N S P. Dynamic Material Studies in Subcritical Experiments: Rocco, Mario, Vito, and Armando [R]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 2003: 23-26.

[4] Obst A W, Boboridis K, Payton J R, et al. Surface-Temperature Measurements under Shock Compression [R]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 2003: 44.

[5] Williams Q, Jeanloz R, Bass J, et al. The Melting Curve of Iron to 250 Gigapascals: A Constraint on the Temperature at Earth's Center [J]. Science, 1987, 236(4798): 181-182.

[6] Holmes N C. Fiber-Coupled Optical Pyrometer for Shock-Wave Studies [J]. Rev Sci Instrum, 1995, 66(3): 2615-2618.

[7] Leal B, Baudin G, Goutelle C. An Optic Pyrometer for Time Resolved Temperature Measurements in Detonation Wave [A]//Eleventh International Symposium on Detonation [C]. Snowmass, 1998: 353-361.

[8] Wang G C, Yu Q Y, Tan X X, et al. Six Channel Instantaneous Optical Pyrometer [J]. Opto-electronic Engineering, 1996, 23(Supplement): 46-49. (in Chinese)
王贵朝, 余泉有, 谭显祥, 等. 六通道瞬态光学高温计 [J]. 光电工程, 1996, 23(增): 46-49.

[9] Yu B, Du C Z. Study on the Temperature Determination Technique for Ignition and Combustion of Propellants [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2001, 24(2): 28-31. (in Chinese)
余 斌, 杜成中. 发射药点火燃烧测温技术探索研究 [J]. 火炸药学报, 2001, 24(2): 28-31.

[10] Qi D R, Zhao L. Application of the High-Temperature Radiation Thermometer in Heat Treatment Production [J]. Techniques of Automation & Applications, 2003, 22(4): 79-80. (in Chinese)
齐德荣, 赵 岚. 辐射高温计在热处理生产中的应用 [J]. 自动化技术与应用, 2003, 22(4): 79-80.

[11] Shi D H, Sun J F, Chen Y K, et al. Optimization of Wavelength Bandwidth for a Dual-Wavelength Fiber-Optic Temperature Measuring System [J]. Chinese Journal of Laser, 2004, 31(11): 1367-1372. (in Chinese)
施德恒, 孙金峰, 陈玉科, 等. 一种双波长光纤测温系统波长带宽的优化设计 [J]. 中国激光, 2004, 31(11): 1367-1372.

[12] Tan H. Shock Temperature Measurements for Meltals (Ⅰ)—Calibration of Pyrometers and Data Reduction for the Temperature at the Interface [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1994, 8(4): 254-263. (in Chinese)
谭 华. 金属的冲击波温度测量(Ⅰ)——高温计的标定和界面温度的确定 [J]. 高压物理学报, 1994, 8(4): 254-263.

The Influence of Filter on Channel Linearity of Instantaneous Optical Pyrometer

WANG Rong-Bo, LI Ze-Ren

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Filter is an important subassembly of instantaneous optical pyrometer system, and the parameters of filter have serious influence on performance of optical pyrometer. In this paper, the influence of filter's bandpass half width, background transmittance and peak transmittance on the channel linearity had been discussed. The results of calculation indicate that the filter's parameters have greater influence on channel linearity. The results provide reference for selecting proper filter in design of high-performance optical pyrometer.

Key words: filter; optical pyrometer; linearity