

泄爆管瞬态火焰温度光谱法测量

罗蕴华 王俊德 陈作如

(华东工学院化工学院, 南京 210014)

摘要 火焰温度是泄爆管重要性能参数。因其泄爆点火时间在微秒至毫秒级,故一般测温方法不适用这类瞬态过程。本文介绍一种改进的钠谱线翻转光谱测温方法,它以高速斩光器机械地遮断参考光源,用高频响的接收转换和瞬态记录装置实时记录火焰和火焰与参考光源叠加时的光谱辐射强度,即可测得各瞬时的火焰温度随时间变化曲线。

该方法的特点是实时、非接触测量,测温范围 1500~3000K,时间分辨率 $<50\mu\text{s}$,它操作简便,数据可靠,同样也适用于其他瞬态高温系统,如枪口闪光温度测量。

关键词 泄爆管 瞬态温度 光谱法测量

1. 引言

泄爆管是新型的低爆速点火系统,它具有传火速度快、点火均匀的特点。泄爆管点火瞬时的火焰温度及其变化是研究点火可行性和可靠性的重要参数,是人们非常关心的问题。火焰温度测量的方法有许多种,因为光谱法测量不但精度高、准确性好,而且它不干扰燃烧过程,所以已得到广泛应用。但是,泄爆管的泄爆点火过程是瞬态过程,其工作时间在微秒至毫秒级,一般的光谱测量方法不能测得这类爆燃过程的瞬态火焰温度。我们建立了一套改进的钠谱线翻转法测温装置,用该方法较好地测得几种不同结构泄爆管的瞬时火焰温度及温度随时间的变化曲线。

2. 改进钠谱线翻转法测温系统

用钠谱线翻转法^[1]测定火焰温度已得到广泛应用,其基础是普朗克和基尔霍夫辐射定律。当参考光源发出的连续辐射通过钠火焰时,经分光系统在 589.0nm 和 589.6nm 处可呈现钠原子辐射线状光谱。如果参考光源的亮度温度低于火焰温度时,钠谱线呈现亮线,反之则呈现暗线。当参考光源的亮度温度等于火焰温度时,在钠谱线光谱处,火焰的辐射能量等于它从参考光源吸收的能量,此时,钠谱线消失,该点称为钠谱线翻转点。因此,调整参考光源的亮温就可以测得火焰温度。很显然,这种方法不适于用来测量爆燃体系的瞬态火焰温度,必须进行改进。

改进的钠谱线翻转法测温系统是由标准钨带灯、透镜、斩光器、单色仪、瞬态记录仪和计算机数据处理系统组成,见图 1。其测量原理如下:用精密光学高温计校准过的钨带灯作参考光源,被测火焰中必须含有钠原子。当钨带灯发出的连续光谱通过钠火焰时,在钠谱线处参考光源和钠火焰的辐射光谱强度叠加。在参考光源和钠火焰间加一个斩光器,当斩光器高速转动时,交替地遮断钨带灯发出的连续辐射。这种断续辐射经单色仪分光后,

由高频响的光电倍增管接收,并将光信号转换成电信号,再经放大后由瞬态记录仪分别记录在有和没有标准钨带灯辐射叠加情况下,钠火焰在 589.0nm 谱线处的相对辐射光谱强度。因此可以测得下述三个物理量:1. 标准钨带灯的辐射光谱强度 I_L ; 2. 钠火焰的辐射光谱强度 I_r ; 3. 钨带灯和钠火焰叠加的辐射光谱强度 I_{L+r} 。

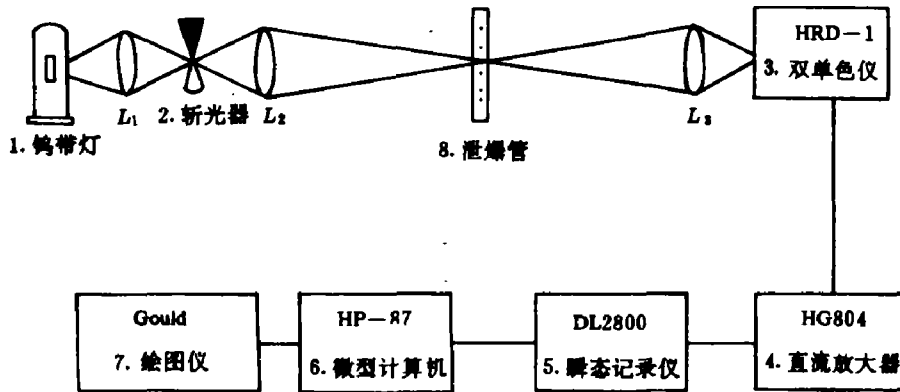


图 1 光谱法测温示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spectroscopic temperature measurements

1. Tungsten ribbon lamp, 2. Chopper, 3. Monochromator, 4. Direct amplifier, 5. Transient recorder, 6. Micro-computer, 7. Plotter, 8. Detonating fuse.

利用 G. Klingenber^[2,3]等人提出的下述公式,可以计算火焰温度。公式推导已在文献[4~6]中详细推导,现简述如下。

根据 Planck 辐射定律和 Wein 公式,可以导出辐射强度关系式为

$$I = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/k\lambda T} - 1} \quad (1)$$

式中: h 为 Planck 常数; c 为光速; k 为 Boltzmann 常数; λ 为波长; T 为辐射体温度。

一般情况下, $e^{hc/k\lambda T} \gg 1$, (1)式可以简化为

$$I = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/k\lambda T}} \quad (2)$$

由(2)式可以分别求得

$$I_L = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} e^{-hc/k\lambda T_L} \cdot D \quad (3)$$

$$I_r = \alpha \cdot 2\pi hc^2 \lambda^{-5} e^{-hc/k\lambda T_r} d\lambda \quad (4)$$

$$\begin{aligned} I_{L+r} &= 2\pi hc^2 \lambda^{-5} e^{-hc/k\lambda T_L} \cdot D - \alpha \cdot 2\pi hc^2 \lambda^{-5} e^{-hc/k\lambda T_r} d\lambda + \alpha \cdot 2\pi hc^2 \lambda^{-5} e^{-hc/k\lambda T_r} d\lambda \\ &= I_L + \alpha I_L d\lambda / D + I_r \end{aligned} \quad (5)$$

由(5)式得

$$\alpha \cdot \frac{d\lambda}{D} = \frac{I_L + I_r - I_{L+r}}{I_L} \quad (6)$$

式中, D 为单色仪入射狭缝宽度, α 为钠谱线吸收系数, $d\lambda$ 为钠谱线宽度。

由(3)和(4)式得

$$\ln \frac{I_r}{I_L} = \ln \frac{\exp(-\frac{hc}{k\lambda T_r})}{\exp(-\frac{hc}{k\lambda T_L})} \cdot \alpha \frac{d\lambda}{D} \quad (7)$$

将(6)式代入(7)式后化简得:

$$T_f = \left[T_c^{-1} + \frac{k\lambda}{ch} \ln \frac{I_L + I_f - I_{L+f}}{I_f} \right]^{-1} \quad (8)$$

由实验测得 I_f 、 I_L 和 I_{L+f} 三个物理量,根据(8)式可以计算得到火焰温度。

3. 泄爆管瞬态火焰温度测量

1. 实验方法

调整光路使钨带灯灯丝成象在单色仪狭缝上。用标准钠光灯校正单色仪的波长。开动斩光器,瞬态记录仪等仪器,使整个光谱测温系统处于待测的工作状态。将泄爆管放置在测量光路的焦点上,用压电传感器同步触发电子点火器和瞬态记录仪,触发点火时瞬态记录仪开始记录测光信号。在火焰进入测量光路之前,记录的波形是标准钨带灯的相对辐射光谱强度 I_L 。火焰进入光路后,当斩光器处于“关”的状态时,测得的是火焰在钠谱线(589.0nm)处相对辐射光谱强度 I_f ;当斩光器处于“开”的状态时,测得的是标准钨带灯的辐射和火焰辐射相叠加的相对光谱强度 I_{L+f} 。图2是惰性泄爆管,固定点泄爆测得的相对辐射的光谱强度波形图,横坐标是时间,纵坐标是光谱强度。图中上包络线是各瞬时对应的 I_{L+f} 值,下包络线是各瞬时对应的 I_f 值。根据公式(8)编制软件程序,用计算机进行数据处理,得到各瞬时对应的火焰温度,绘图仪便可以绘制出泄爆管瞬态火焰温度随时间变化曲线。

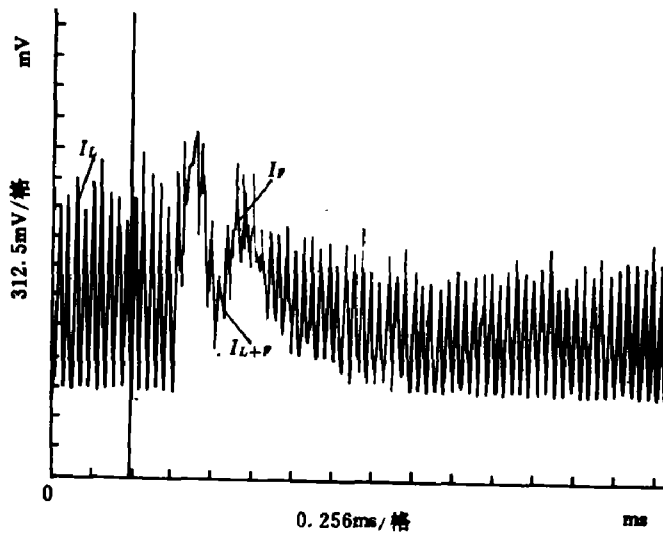


图2 实测 I_L 、 I_f 和 I_{L+f} 波形图

Fig. 2 The measured waveforms of I_L , I_f and I_{L+f}

2. 实验结果

用上述光谱测温装置对不同结构的泄爆管进行实测。仪器特性参数:标准钨带灯亮温 $T_c = 2253\text{K}$;光电倍增管供电电压为 -880V ;斩光器的调制频率为 25kHz ;瞬态记录仪采样速度为 $1\mu\text{s}/\text{点}$,采样时间 $4096\mu\text{s}$,预置时间 $496\mu\text{s}$ 。测得的火焰温度-时间曲线见图3和图4,实验结果列入表1。图3是可燃型泄爆管固定点泄爆的温度时间曲线,图4是可燃型泄

爆管随机点泄爆的温度时间曲线。

表 1 泄爆管瞬态火焰温度

Table 1 Temporal flame temperature of the detonating fusse

序号	泄爆管结构	图 号	火焰温度/(K)	泄爆时间/(ms)
1	惰性,固定点泄爆	2	1800~2300	1.5
2	可燃,随机点泄爆	3	1600~1900	1.2
3	可燃,随机点泄爆	4	1700~2000	1.6
4	可燃,固定点泄爆		1600~2100	1.5
5	可燃,固定点泄爆		1600~1900	1.2

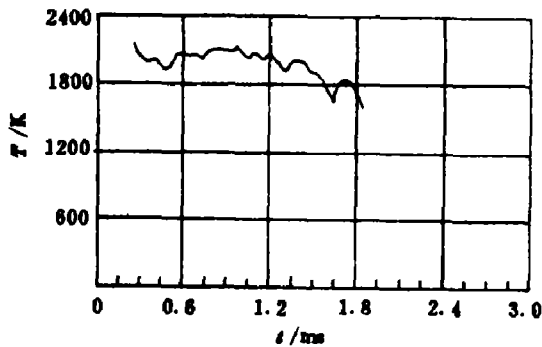


图 3 瞬态火焰温度-时间曲线

Fig. 3 Temporal flame temperature-time curve

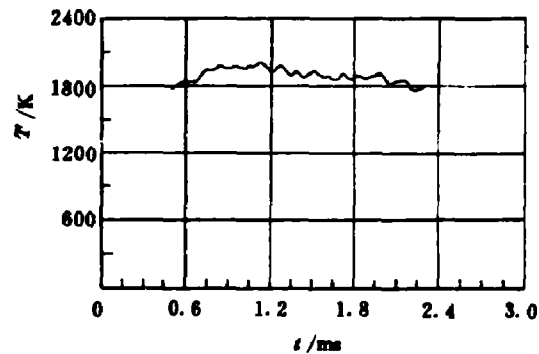


图 4 瞬态火焰温度-时间曲线

Fig. 4 Temporal flame temperature-time curve

4. 结语

用改进的钠谱线翻转光谱法多次重复实验测得泄爆管点火装置爆燃瞬时火焰温度为 1600K—2300K,泄爆时间为 1.2ms—1.6ms,不同结构泄爆管爆燃瞬时火焰温度随时间变化的规律亦不相同,可燃泄爆管固定点泄爆点火装置其火焰温度随时间变化的均匀性最佳。该实验结果可信,与理论分析基本一致,为泄爆管点火装置的结构设计提供了重要的依据。

该方法的测温范围为 1500—3000K,时间分辨率为 50 μ s,它是一种可靠,简便非接触的实时测量方法,它不仅适用于泄爆管瞬态火焰温度测量,而且也适用于其他爆炸物非稳态燃烧瞬态火焰温度的测量,如枪口闪光温度测量^{[6],[7]}。

参 考 文 献

[1] Кадышенич. А. Е., (王宗源译), 火焰温度测量, 上海科学技术出版社, (1961)。

- [2] Klingenberg, G., Mach, H., *Combustion and Flame* 27(1976), 163.
- [3] Schröder, G. A., Klingenberg, G., *1st International Symposium on Ballistics*, (1974), 1-19.
- [4] 李鸿志, 王俊德, 罗蕴华, 陈作如, *分析化学*, 16(1988), 203.
- [5] Wang, J., et al., *Spectroscopy Letters*, 22(8)(1989), 1111.
- [6] 李鸿志, 王俊德等, *光谱学与光谱分析*, 10(5)(1990), 27.
- [7] 李鸿志, 许厚谦, *兵工学会第四届测试技术学术年会论文集*, 第4册, (1988), 363.
- [8] 卞海燕, 王俊德, *理化检验化学分册*, 2(1989), 124.

SPECTROSCOPIC MEASUREMENT FOR TEMPORAL FLAME TEMPERATURE OF THE DETONATING FUSEE

Luo Yunhua, Wang Junde, Chen Zuoru

(*Chemistry Department, East China Institute of Technology, Nanjing*)

ABSTRACT Flame temperature is a very important parameter of the detonating fusee. As its detonation time only last from several microseconds to several milliseconds, it is very difficult for ordinary methods to measure this temporal flame temperature. The article describes a modified sodium line reversal method, in which we use a quick chopper to block the reference light, then use a high frequency receiver and a digital recorder to get the spectrum radiance of the flame and afterwards the spectrum radiance of the flame added with the reference light, and finally obtain the flame temperature time curve.

The speciality of the method is that it is a kind of real-time, noncontact measurement, ranging from 1500 K to 3000K and the time resolving power < 50 microseconds. The method is rather simple and the data obtained are reliable, it can also be used in other temporal high temperature system such as temperature measurement inside the muzzle flash of a rifle.

KEY WORDS detonating fusee, temporal temperature, spectroscopic measurement.