

# 基于原子发射双谱线的温度测量技术研究

胡晓涛, 郝晓剑, 段向港

中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051

**摘要** 基于原子发射双谱线测温原理,提出了基于硅光电倍增管的光电测温系统,介绍了该测温装置的结构及测温原理。基于原子光谱数据库选择 Al I 690.6 nm 和 Al I 708.5 nm 作为测温时的温标谱线,通过光电测温计测量铝在纯氧中燃烧时的温度,并将其与热电偶测量的温度进行对比。结果表明,两种方法测得温度的平均相对误差为 1.5%,证明了基于原子发射双谱线测温技术的可行性。

**关键词** 原子与分子物理学; 原子发射光谱; 瞬态高温; 原子光谱数据库; 硅光电倍增管

**中图分类号** TB942; TM930.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.100201

## Temperature Measurement Technology Based on Double Line of Atomic Emission Spectra

Hu Xiaotao, Hao Xiaojian, Duan Xianggang

National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China,  
Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** Based on the temperature measurement principles of double line of atomic emission spectrum, the photoelectric pyrometer based on silicon photomultiplier is proposed, and the structure and temperature measurement principle of the photoelectric pyrometer are introduced. Al I 690.6 nm and Al I 708.5 nm are selected from the atomic spectra database as the temperature measurement element spectral lines. The temperatures of aluminum burnt in pure oxygen are obtained by photoelectric thermometer and compared with temperatures measured by the thermocouple. The results show that the average relative error of temperatures measured by the two methods is 1.5%, which proves the feasibility of the proposed method.

**Key words** atomic and molecular physics; atomic emission spectroscopy; transient high temperature; atomic spectra database; silicon photomultiplier

**OCIS codes** 020.1335; 120.6780; 020.1335; 250.6715

## 1 引言

温度是国际单位制中 7 个基本物理量之一,它与工业生产和科研活动密切相关。在航天、航海、冶金等领域,常要求对温度进行精确测量,尤其是对瞬态高温进行精确测量。目前主要的测温方法分为接触式测温与非接触式测温两大类。接触式测温主要有热电偶测温法、膨胀式测温法等。常用的接触式测温元件是热电偶,它具有结构简单、测温范围广、准确度高等优点,是目前应用最广泛的温度传感器<sup>[1]</sup>。非接触式测温以辐射式比色测温法和光谱测温法为代表。接触式测温元件受其耐高温材料的限制,不能用于较高温度的测量,而非接触式测温由于响应速度快,不会破坏被测介质的温度场,理论上没有测温上限,因此得到了广泛研究<sup>[2]</sup>。目前,利用发射光谱测量火焰温度的方法主要包括利用特征原子发射谱线和连续光谱进行测温这两

收稿日期: 2017-05-15; 收到修改稿日期: 2017-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(61473267)

作者简介: 胡晓涛(1993—),男,硕士研究生,主要从事光电探测理论与技术等方面的研究。E-mail: 635499244@qq.com

导师简介: 郝晓剑(1969—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事动态测试技术与光电仪器设计等方面的研究。

E-mail: zhang\_gf@163.com(通信联系人)

种方式。本文采用特征原子发射双谱线测温法对温度进行测量<sup>[3]</sup>。

对爆炸场的光谱进行分析后发现,炸药爆炸时存在铝、铜等的原子发射谱线。由原子发射双谱线测温原理可知同一元素的2条原子发射光谱的强度比与温度的关系式<sup>[4]</sup>。通过测量爆炸场光谱中铝的2条原子发射光谱的强度之比,就可以得到爆炸场的瞬态温度,这种方法具有成本低、测量方便等优势<sup>[5]</sup>。因此,研究铝原子发射双谱线温度测量技术对瞬态高温的测量具有重要意义。

## 2 基本原理

### 2.1 原子发射双谱线测温原理

在正常状态下,大部分物质处于分子状态。当基态原子受到热(如火焰)或电(如电火花)的激发后会跃迁到能量较高的激发状态,并产生高温、高密度的等离子体。激发态原子的寿命很短,且不稳定,会跃迁到低能态或基态,并释放出多余的能量。此时,等离子体中的激发态原子和离子在弛豫过程中发射出特征谱线,即线状光谱<sup>[6]</sup>。

由原子发射光谱理论可知,在一定温度下,系统处于热力学平衡或局部热力学平衡状态时,原子数在各个能级上的分布服从玻尔兹曼分布<sup>[7]</sup>:

$$N_i = N_0 \frac{g_i}{g_0} \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right), \quad (1)$$

式中  $N_i$  和  $N_0$  分别为处于激发态  $i$  和基态的原子数,  $g_i$  和  $g_0$  分别为激发态  $i$  和基态的统计权重,  $E_i$  为激发态  $i$  的能量,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为激发温度。

在热力学平衡状态或局部热力学平衡状态下,原子谱线的形成过程包括3种基本过程,即自发辐射、受激辐射和受激吸收。根据爱因斯坦辐射理论,谱线强度为

$$I_{ji} = A_{ji} h \nu_{ji} N_j + B_{ji} \rho(\nu) h \nu_{ji} N_j - B_{ij} \rho(\nu) h \nu_{ji} N_i, \quad (2)$$

式中  $N_j$  为处于激发态  $j$  的原子数,  $I_{ji}$  为谱线强度,  $A_{ji}$  为自发辐射爱因斯坦系数,  $h$  为普朗克常数,  $\nu_{ji}$  为波的频率,  $B_{ji}$  和  $B_{ij}$  分别为自发吸收系数和受激辐射系数,  $\rho(\nu)$  为辐射场的辐射密度。

在热力学平衡状态下,  $B_{ji} \rho(\nu)$  远小于  $A_{ji}$ , 故受激辐射可以忽略。当光谱无自吸时,谱线强度可改写为  $I_{ji} = A_{ji} h \nu_{ji} N_j$ , 从而可得同种元素的2条原子谱线强度之比为

$$\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} = \frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT}\right), \quad (3)$$

式中  $I_{\lambda_1}$  和  $I_{\lambda_2}$  分别为波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的谱线强度,  $A_1$  和  $A_2$  分别为波长  $\lambda_1$  和波长  $\lambda_2$  的自发辐射爱因斯坦系数,  $g_1$  和  $g_2$  分别为波长  $\lambda_1$  和波长  $\lambda_2$  的统计权重。由此可得温度  $T$  的表达式<sup>[8]</sup>为

$$T = \frac{1}{k} \frac{E_2 - E_1}{\ln(I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2}) - \ln[A_1 g_1 \lambda_2 / (A_2 g_2 \lambda_1)]}. \quad (4)$$

### 2.2 铝原子谱线的选择

美国国家标准与技术研究院(NIST)的原子光谱数据库(ASD)涵盖了绝大多数已知化学元素的原子以及相应离子的辐射跃迁数据和能级数据。辐射跃迁数据包含了谱线的辐射跃迁几率,能级数据包含了所有光谱的基态和电离能数据。

在380~780 nm范围内,共有21条铝原子谱线,主要分布在700 nm左右。从中选择2条谱线作为温标元素的温标谱线,2条温标谱线强度应适中,且间隔不宜过大,这样可以避免光谱辐射率、光谱透射率等对光谱测量的影响。令电子温度  $T_e = 0.8$  eV,电子密度  $N_e = 1 \times 10^{10}$  cm<sup>-3</sup>,铝原子谱线光谱图如图1所示。

19条铝原子谱线光谱图如图2所示。从图2可以看出:Al I 690.6 nm对应谱线的相对强度为6401;Al I 708.5 nm对应谱线的相对强度为9718。经过分析比对,选取Al I 690.6 nm和Al I 708.5 nm为原子发射双谱线测温的温标谱线。

### 2.3 实验系统

铝原子发射双谱线测温装置分为2部分,如图3所示。热电偶采用Nanmac公司的K型热电偶(材料为镍铬与镍铝),最大温度范围为-200~1300 °C,延展级为0~200 °C,精度为0.75%,响应时间小于20 ms。

信号调理电路的放大倍数为 50 倍<sup>[9]</sup>。

设置数据采集系统的采样频率为 10 kHz, 采样时间为 20 s。数据采集卡采用四川拓普测控科技有限公司的 PCI-20612 型采集卡。数据采集模块中采集软件采用数据采集卡配套的 TopView2000 软件, 软件具备波形实时显示、读取数据、数据处理、存盘、打印及通信功能, 而且操作直观、便捷<sup>[10]</sup>。

实验中使用爱尔兰 SensL 公司的 10035-X08 型硅光电倍增管(SiPM), 其参数如表 1 所示。该光电倍增管具有工作电压低、稳定性高、集成度高、抗干扰能力强等优点。

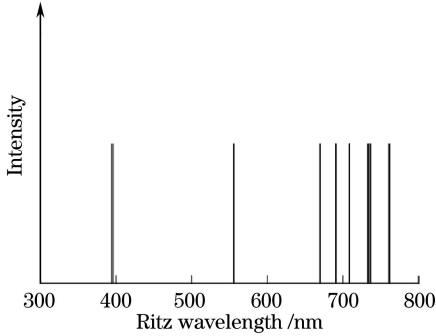


图 1 380~780 nm 波长范围内 Al I 原子谱线位置分布图

Fig. 1 Al I distribution diagram of atomic spectral lines location at wavelength of 380-780 nm

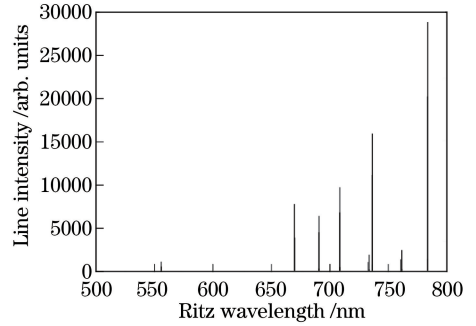


图 2  $T_e=0.8$  eV、 $N_e=1\times 10^{10}$  cm<sup>-3</sup> 时 Al I 原子谱线光谱图

Fig. 2 Al I atomic spectral lines spectrogram under the conditions of  $T_e=0.8$  eV and  $N_e=1\times 10^{10}$  cm<sup>-3</sup>

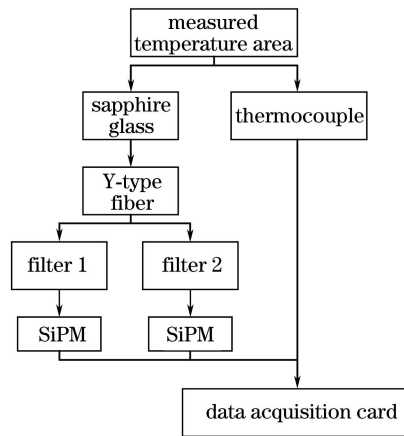


图 3 温度测试系统的结构图

Fig. 3 Structure of temperature measurement system

表 1 硅光电倍增管的参数

Table 1 Parameters of silicon photomultiplier

Parameter	Value
Spectral range /nm	400-1000
Peak wavelength $\lambda_p$ /nm	500
Photon detection efficiency at $\lambda_p$ /%	20
Gain / $10^6$	2.3
Dark current / $\mu$ A	0.4
Recommended operating temperature range / $^{\circ}$ C	0-30
Breakdown voltage /V	$27\pm 0.5$

原子发射双谱线测温系统主要由光学系统、光电转换系统和数据采集系统组成。光学系统主要包括蓝宝石窗、传光及分光的 Y 型光纤以及滤光片。光电转换系统由硅光电倍增管及适配电路组成。数据的存储采集由数据采集卡完成。

### 3 实验过程及结果

首先在坩埚中放入适量的铝粉,然后用氢氧焰将铝粉加热至红热状态,然后通入氧气,在氧气作用下,铝粉剧烈燃烧,并持续燃烧一段时间。铝粉燃烧过程中的部分辐射光由聚焦透镜会聚后经由光纤传至固态光电倍增管中,固态光电倍增管将光谱信号转换为电压信号,然后传送至计算机进行处理。同时,K型热电偶产生的输出电压经信号处理电路放大后,由数据采集系统进行采集。

实验过程中,铝粉在氧气中剧烈燃烧,产生耀眼的白光,同时放出大量的热,并生成白色固体。光电测温计测得铝粉燃烧的最高温度为 1270 °C, K 型热电偶测得最高温度约为 1294 °C,如图 4 所示。

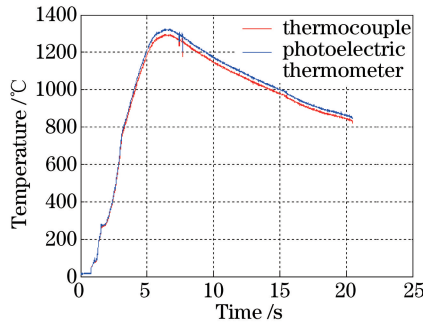


图 4 光电测温计和 K 型热电偶的测温结果

Fig. 4 Measured results of photoelectric thermometer and K-thermocouple

设光电测温计测得的温度为  $T_1$ ,以 K 型热电偶测得的温度  $T_2$  为标准温度,计算它们的相对误差,结果如表 2 所示,平均相对误差为 1.5%。

表 2 光电测温计和 K 型热电偶测得的温度及它们的相对误差

Table 2 Temperatures measured by photoelectric thermometer and K-thermocouple and relative error between measured temperatures

$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	Relative error / %	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	Relative error / %
813	825	1.5	1543	1567	1.5
936	921	1.6	1437	1459	1.5
1022	1037	1.4	1312	1333	1.6
1143	1160	1.5	1220	1235	1.2
1260	1278	1.4	1156	1172	1.4
1380	1399	1.4	1068	1082	1.3
1454	1472	1.2	954	966	1.2

相对误差产生的原因主要包括:

1) 谱线的自吸与自蚀现象。自吸现象会导致原子发射光谱的强度变弱,若自吸现象比较严重,谱线的峰值强度就会被完全吸收,谱线形状会发生凹陷,此时就会产生自蚀现象。自吸与自蚀现象会影响原子发射双谱线测温法的精度,从而产生测量误差。

2) 选取的原子谱线参数对计算结果有一定影响,如跃迁几率、能级能量。在测量时,温度场热力学平衡的偏差也会造成测量误差。

3) 测量过程中杂散光的干扰。

4) 仪器本身固有的误差。

### 4 结 论

针对接触式测温方法存在的问题,利用非接触式测温法中的原子发射双谱线测温技术对温度场进行测量,该方法具有测量时间短、相对误差较小等优点。实验结果表明,在误差允许的范围内,选取 Al I 690.6 nm 和 Al I 708.5 nm 作为原子发射双谱线测温法的温标谱线是可行的,且具有较高的应用价值。

### 参 考 文 献

[1] Hao Xiaojian, Zhang Genfu, Zan Qingbo. Thermocouple time constant test system and uncertainty analysis based on

- semiconductor laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 081408.
- 郝晓剑, 张根甫, 管清波. 基于半导体激光器的热电偶时间常数测试系统及不确定度分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 081408.
- [2] Zhou X T, Wang J D, Huang Z H. In-bore measurements of gas velocity and of radial gas temperature distribution[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2001, 13(5): 360-364.
- [3] Shao Yanming, Zhao Shu'an, Chen Yanru, *et al.* Temperature measurement of flame at converter mouth based on multi-spectral thermometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1130002.
- 邵艳明, 赵书安, 陈延如, 等. 基于多光谱测温法的转炉炉口火焰温度预测研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1130002.
- [4] Guo Xueyong, Li Xiuli, Zhang Liming, *et al.* Spectroscopy measurement on temperature of explosion products of non-ideal explosive[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 31(5): 647-649.
- 郭学永, 李秀丽, 张黎明, 等. 非理想炸药爆炸产物温度的光谱法测试[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 31(5): 647-649.
- [5] Chen Xiaobin, Cai Xiaoshu, Fan Xueliang, *et al.* Experimental study on flame temperature measurement by double line of atomic emission spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(12): 3177-3180.
- 陈晓斌, 蔡小舒, 范学良, 等. 原子发射双谱线法测火焰温度的实验研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(12): 3177-3180.
- [6] Sun Chengqi, Gao Yang, Yang Deming, *et al.* Spectroscopic method for measuring electron temperature and electron density of thermal spray plasma[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 043001.
- 孙成琪, 高阳, 杨德明, 等. 光谱法测量低压热喷涂等离子体的电子温度和电子密度[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(4): 043001.
- [7] Cai Zhilong, Yang Qiusong, Wang Yang. Femtosecond laser-induced breakdown spectral analysis of Cu-Al alloy sputtered thin films[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0615001.
- 蔡志龙, 杨秋松, 王阳. 铜铝合金溅射薄膜的飞秒激光诱导击穿光谱分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0615001.
- [8] Li Xiuli, Hui Junming, Zhang Lin. Explosion temperature measurement of thermobaric explosive by remote sensing spectroscopic method[J]. *Journal of Ballistics*, 2008, 20(2): 91-94.
- 李秀丽, 惠君明, 张琳. 光谱法遥感测定温压炸药温度的研究[J]. *弹道学报*, 2008, 20(2): 91-94.
- [9] Sun Xiaogang, Dai Jingmin, Cong Dacheng, *et al.* Plume temperature measurement of a solid propellant rocket engine using multispectral thermometry[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology Edition)*, 2003, 43(7): 916-918.
- 孙晓刚, 戴景民, 丛大成, 等. 基于多光谱法的固体火箭发动机羽焰温度测量[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2003, 43(7): 916-918.
- [10] Zhang Genfu, Hao Xiaojian, Sang Tao, *et al.* Study on the dynamic response of thermocouple temperature sensor[J]. *China Measurement & Test*, 2015, 41(10): 68-72.
- 张根甫, 郝晓剑, 桑涛, 等. 热电偶温度传感器动态响应特性研究[J]. *中国测试*, 2015, 41(10): 68-72.