

文章编号: 1001-3806(2014)04-0459-04

## 基于镁合金燃点测试的比色测温装置

王攀,郝晓剑\*,周汉昌,闫白

(中北大学 电子测试技术国家重点实验室,太原 030051)

**摘要:**为了解决阻燃镁合金的关键参量燃点测试的难题,采用比色测温法进行了理论分析和实验验证,并设计了结构新颖的比色测温装置。提出了由测温装置接收光辐射能量的突变点判断镁合金何时起燃,从而求出燃点温度;由中温黑体炉对系统进行静态标定来获得静标系数;而用电加热薄片电阻法来点燃镁合金,具有操作简单、节省时间和实验原料的优点。通过对含Nd质量分数为0.0075的AZ80镁合金燃点进行了测试,比色测温装置和红外测温仪的测量结果分别是1164.7K和1148.2K,其相对误差为1.4%。结果表明,比色测温法成功解决了镁合金燃点测试难的问题,且对阻燃镁合金的相关研究及镁合金冶炼的在线监测具有较重要的参考价值。

**关键词:** 光电子学;镁合金;比色测温;燃点;电加热薄片电阻**中图分类号:** TN247 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.04.006

## Colorimetric temperature measurement device based on ignition point test of magnesium alloy

WANG Pan, HAO Xiaojian, ZHOU Hanchang, YAN Bai

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

**Abstract:** To solve the measurement of ignition point, the key parameter of ignition-proof magnesium alloy, the colorimetric temperature measurement method was used for the theoretical analysis and experimental verification. A colorimetric temperature measurement device with new structure was designed. The time of the ignition of magnesium alloy was determined from the mutation point of optical radiant energy received by the temperature measurement device and then the ignition temperature was obtained. The static calibration coefficients were gotten from the static calibration of the moderate temperature blackbody furnace. Moderate temperature blackbody furnace was utilized to calibrate statically to obtain static calibration coefficient. Magnesium alloy was ignited with an electrical heating slice resistance with the advantages of simple operation, saving time and test materials. The results of the ignition test of AZ80 with Nd (mass fraction of 0.0075) by colorimetric temperature measurement device and infrared thermometer were 1164.7K and 1148.2K, respectively, whose relative error was 1.4%. The results show that this method solves the difficulty of testing the ignition point of magnesium alloy successfully and has very important reference value for the related research of flame retardant magnesium and on-line monitoring of magnesium alloy smelting.

**Key words:** optoelectronics; magnesium alloy; colorimetric temperature measurement; ignition; electrical heating slice resistance

### 引 言

镁元素在地球上分布广泛且储量巨大,制成的

镁合金材料密度小、强度高,在航空航天、电子等领域有良好的应用前景<sup>[1-3]</sup>。但在实际应用中,镁元素活泼的化学特性导致在高温、剧烈摩擦时易于燃烧,阻燃镁合金技术<sup>[4-6]</sup>能较好地解决这一缺点。其中,燃点测试是表征镁合金阻燃效果的一个重要参量,因此燃点测试研究具有重要的意义。

目前,国内外普遍采用热电偶接触式测量<sup>[7]</sup>的方法,将纯镁或镁合金直接放入管式电阻炉内或放入坩埚随炉加热,测温热电偶一般选用镍铬-镍硅热电偶,实验装置庞大且实验用料较多,电阻炉升温很

基金项目:山西省回国留学人员科研资助项目(2012-068);太原市科技局明星专项资助项目(120247-20);山西省人社厅留学人员科研活动资助项目

作者简介:王攀(1991-),男,硕士研究生,研究方向为光电探测理论与技术。

\* 通讯联系人。E-mail: haoxiaojian2013@126.com

收稿日期:2013-08-23;收到修改稿日期:2013-11-04

慢以致实验效率低,以肉眼观察法或切线法<sup>[8-12]</sup>建立燃烧点,该方法存在响应慢、结果重复性差、测量精度低等不足。本文中设计了一种小型的比色测温装置,利用镁合金燃烧点前后光谱辐射强度的变化来确定燃点,具有体积小、实验可重复性强、大大削弱发射率变化的干扰等优点,该装置可用于镁合金冶炼和加工生产线的在线温度监测。

### 1 比色测温装置设计

比色测温装置由蓝宝石窗、物镜、场镜、两个不同的窄带干涉滤光片、二象限探测器、放大滤波电路构成,用金属外壳封装保护各部分。其原理框图如图 1 所示。各部分结构及功能是:蓝宝石窗保护装置内部元件不受外界高温、粉尘等干扰及破坏;物镜汇聚所接收的热辐射能;场镜是工作在物镜焦面附近,可以减小辐射光束范围,增大通量,使光敏面接收光照更均匀化;二象限探测器实现电信号的转换,它由 4 个光敏二极管和覆铜板构成,其中左右两侧的上下两个 PIN 管相连,并在左右侧各自胶合覆盖不同波长的窄带干涉滤光片,滤光片与二象限探测器的一体化结构使得整个装置得以小型化,且制作工艺简单、工作可靠;放大滤波电路将两路电压信

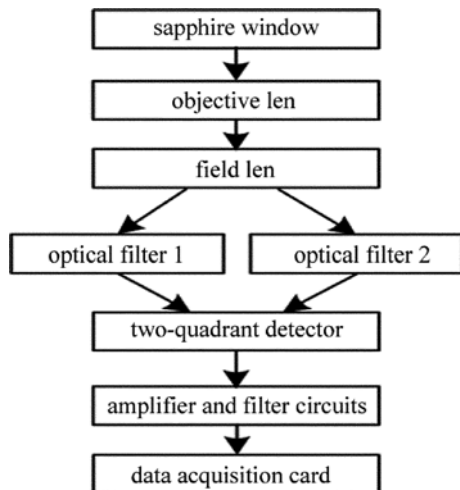


Fig. 1 Functional block diagram of colorimetric temperature test device  
号作放大滤波处理;最后借助数据采集卡完成与主机通信读出数据。

### 2 比色测温原理

比色测温是由接收到的被测温度场在两个波段上的光谱辐射出射度的比值与温度的函数来测量温度。理论基础是普朗克黑体辐射公式。二象限探测器接收的两个波段范围内的辐射能量,转化成了两路光电流<sup>[11]</sup>,两波段的辐射能量的比值  $R(T)$  则有:

$$R(T) = \frac{I_1(T)}{I_2(T)} = \frac{S(\lambda_1) \times \psi(\lambda_1) \times \tau(\lambda_1) \times \varepsilon(\lambda_1, T) \times \int_{\lambda_1-\Delta\lambda/2}^{\lambda_1+\Delta\lambda/2} M_1(\lambda, T) d\lambda}{S(\lambda_2) \times \psi(\lambda_2) \times \tau(\lambda_2) \times \varepsilon(\lambda_2, T) \times \int_{\lambda_2-\Delta\lambda/2}^{\lambda_2+\Delta\lambda/2} M_2(\lambda, T) d\lambda} \quad (1)$$

式中,  $M_1(\lambda, T)$  和  $M_2(\lambda, T)$  分别是热力学温度为  $T$  时非黑体在波长为  $\lambda_1, \lambda_2$  下的单色辐射出射度公式;  $I_1(T), I_2(T)$  是二象限探测器两路光电流;  $S(\lambda), \psi(\lambda), \tau(\lambda)$  分别是波长为  $\lambda$  时光学系统光谱透过率、窄带干涉滤光片光谱透过率、两象限探测器响应函数;  $\Delta\lambda$  是选取的系统带宽。其中:

$$M_1(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \quad (2)$$

$$M_2(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \quad (3)$$

式中,  $C_1$  是第一辐射常数,  $C_2$  是第二辐射常数。

设:

$$K = \frac{S(\lambda_1)\psi(\lambda_1)\tau(\lambda_1)\varepsilon(\lambda_1, T)}{S(\lambda_2)\psi(\lambda_2)\tau(\lambda_2)\varepsilon(\lambda_2, T)} \quad (4)$$

$$R_1(T) = \frac{\int_{\lambda_1-\Delta\lambda/2}^{\lambda_1+\Delta\lambda/2} M_1(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_2-\Delta\lambda/2}^{\lambda_2+\Delta\lambda/2} M_2(\lambda, T) d\lambda} \quad (5)$$

则有:

$$R(T) = K \cdot R_1(T) \quad (6)$$

在两个滤光片波长相近时,先不考虑发射率,则  $K$  是装置常数,可由静态标定得到。

### 3 静态标定

用 SR20-32 型中温黑体炉对比色测温装置进行静态标定,打开电源,设置温度从 873K 起每隔 20K

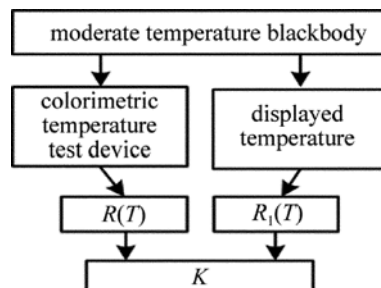


Fig. 2 Block diagram of static calibration of colorimetric temperature test device

使用数据采集卡采集一次两路输出电压,到 1073K 采集结束。装置的静态标定框图如图 2 所示,设中温黑体炉的显示温度为  $T$ ,由(5)式求出  $R_1(T)$ ;同时由比色测温装置的两路输出电压,计算对应的光电流,获得  $R(T)$  值,根据(6)式求出  $K$ 。求取  $K$  的平均值,绘出  $K$  修正后的  $R(T)-T$  曲线,根据  $R(T)$  值查表得到温度。

## 4 镁合金燃点测试

### 4.1 实验准备

实验中采用的镁合金是含 Nd(质量分数为 0.0075)的 AZ80,其主要元素质量分数分别为:Al(0.0741),Zn(0.00522),其余大部分为镁元素。将镁合金加工成  $6\text{mm} \times 6\text{mm} \times 0.25\text{mm}$  的薄片,便于引燃。

选用电加热薄片电阻材料时,要选电阻率大一些,线膨胀系数不能过大,熔点要高一些(由于镁合金的燃点基本都在 1273K 以下,故要选熔点高于 1273K 的材料),从而保证该材料导热快又不会在镁合金燃烧前变形过大和熔化,最终选用 304 不锈钢片,剪成  $80\text{mm} \times 15\text{mm} \times 0.03\text{mm}$  的薄片,以便加快导热速度和均匀受热。

所需的实验设备有:(1)美国安捷伦(Agilent) N8737A 直流电源(direct-current, DC),额定输出为 60V/55A,为电加热薄片电阻提供电流,从而使其升温;(2)美国 IRCON 公司 Modline5 系列的 5R-1410 型红外测温仪(以下简称 M5),测温范围为 873K ~ 1673K,作为标准测温仪器,即以红外测温仪测温结果作为真实温度;(3)四川拓普测控科技有限公司 PCI-20612 数据采集卡及提供支持的 TopView2000 软件,用于两路电压数据的采集、读取及处理分析。

根据已有的纯镁及镁合金燃点测试文献,判断所需测试的温度范围在 673K ~ 1273K。实验前,利用 Ocean Optics 公司的 USB4000 微型光纤光谱仪对点燃的纯镁和实验镁合金进行了光谱测试。发现纯镁燃烧光谱集中在 480nm ~ 900nm 之间,其中 590nm 和 767nm 处辐射强度最大。而实验所用镁合金燃烧光谱集中在 400nm ~ 950nm 之间,其中在 588nm,669nm 和 766nm 附近出现峰值。选择光谱强度峰值对应的波长作为两个滤光片的波长的参照,则测试时会在纯镁和镁合金起燃前后辐射能量会出现爆发性增长,而在输出电压曲线上就是一个拐点。最终选定波长为 650nm 和 850nm 的滤光片,

其带宽为  $\pm 30\text{nm}$ 。

### 4.2 实验方案

镁合金燃点测试的原理框图如图 3 所示,将 DC 与不锈钢片通过导线连成通路,将待测薄片放在不锈钢片的中间位置,然后缓慢增大 DC 的电流  $I$ ,使得不锈钢片的温度不断升高,一旦点燃就停止调节 DC。整个过程中,将 M5 和比色测温装置对准实验镁片,并借助数据采集卡与主机通信,使用 Topview 软件采集数据。

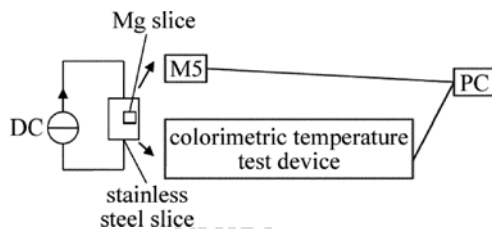


Fig. 3 Functional block diagram of ignition point test of magnesium alloy

### 4.3 实验结果及分析

M5 和比色测温装置的输出电压曲线如图 4 所示,其中 CH1 和 CH2 分别对应滤光片波长为 650nm 和 850nm 的电压输出,CH3 对应 M5 的输出。

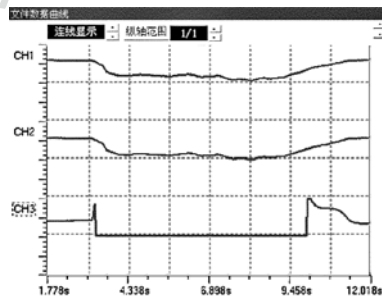


Fig. 4 Output curve of data acquisition card

图 4 中,CH3 曲线两峰值之间存在平直段,因为镁合金燃烧时的辐射能量在 500nm ~ 850nm 区间很大,在大于 1000nm 区间却很小,造成 M5 红外测温仪在 750nm ~ 1050nm 波段接收的能量很大而在高于 1000nm ~ 1100nm 波段则很小,两路信号的比值超出 M5 设置的范围,电路输出几乎为 0。因此 M5 可以反映镁合金式样起燃之前的温度变化,但燃烧变得剧烈的时候信号输出反而为 0。当镁合金被点燃的一瞬间,比色测温装置接收的辐射能量会出现一个拐点,可以由该点确定起燃时间。对 CH1 通道的曲线进行光标读数,发现在 3.235s 时曲线的变化率开始增大(如图 5 所示),故镁合金在该时间起燃,对 M5 和比色测温装置在该时间点进行光标读数,结果见表 1。由表 1 可以看出,M5 和比色测温装置的测温结果相对误差  $e = 1.4\%$ ,证明了该比色

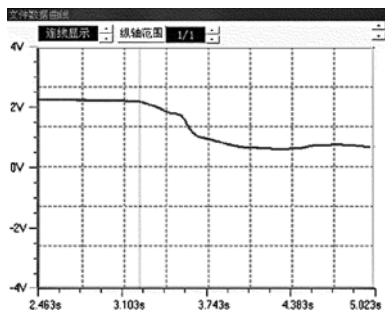


Fig. 5 Oscilloscope of CH1 curve after filtering

Table1 Measurement results of M5 and colorimetric temperature measurement device

M5/V	M5/K	CH1/V	CH2/V	R(T)	T/K	error/%
3.44	1148.2	2.174	2.081	0.778	1164.7	1.4

测温装置用来镁及镁合金燃点温度测试的可行性和合理性。

### 5 结 论

通过镁合金燃烧点建立前后光谱辐射强度的变化准确判定起燃时间点,具有精度高、可重复性好等优点。二象限探测器与滤光片的一体化结构,制备工艺简单、工作可靠。提出电流加热法作为点燃镁片的热源,没有外界强光干扰,测量更准确,克服了传统热电偶接触式测温法响应速度慢、精确度不高、误差相对大、可重复性差等缺点,同时又节省了时间和实验材料。含 Nd(质量分数为 0.0075)的 AZ80 镁合金燃点测试结果表明,其相对误差为 1.4%。该方法对阻燃镁合金的相关研究及镁合金冶炼的在线监测具有很重要的参考价值。

#### 参 考 文 献

[1] WANG R, HAO X J, ZHOU H C, *et al.* Design of infrared

signal detection circuit in a temperature calibration system[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2):247-250(in Chinese).

[2] GE M Z, XIANG J Y, ZHANG Y K. Effect of laser shock processing on resistance to stress corrosion cracking of tungsten inert-gas welded AZ31B magnesium alloy [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2012(12):1203007(in Chinese).

[3] TANG H G, GAO M, ZENG X Y. Tensile strength and microstructure of laser welding of AZ31 magnesium alloy thick plates [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(2):152-155(in Chinese).

[4] LIU S H, LIU J L, LIU H, *et al.* AZ91 magnesium alloy welding based on YAG pulsed laser [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(4):459-462(in Chinese).

[5] ZHAO H J, ZHANG Y H, KANG Y L. Effect of cerium on the ignition point of AZ91D magnesium alloy[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2008, 36(2):42-57(in Chinese).

[6] ZHANG X Y, LI Q N, ZHANG Q. Research progress of ignition proof magnesium alloy with Ca [J]. *Hot Working Technology*, 2011, 40(16):4-6(in Chinese).

[7] QIN L, DING J, ZHAO W M, *et al.* Effect of Ce and Ca additions on property and structure of ignition-proof magnesium alloy [J]. *Foundry*, 2013, 62(5):388-392(in Chinese).

[8] WANG P, SHINOZAKI K, YAMAMOTO M. Evaluation of solidification cracking susceptibility during laser welding by in-situ observation method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6):0603005(in Chinese).

[9] CHEN P, ZHANG M X. Measurement for the flammability point of Mg and Mg alloy [J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2001(2):323-326(in Chinese).

[10] BOBRYSHV B L. Ignition of magnesium and its alloys [J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 1988, 30(3):219-222.

[11] YUAN C M, HUANG D Z, LI C, *et al.* Ignition behavior of magnesium powder layers on a plate heated at constant temperature [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 246/247:283-290.

[12] ZHU J H, HAO X J, ZHOU H C. Implementation of the measurement method and system for transient high-temperature based on colorimetric temperature measurement [J]. *Automation and Instrumentation*, 2010, 25(9):5-8(in Chinese).